

Modelação da evapotranspiração da roseira em cultivo em substrato

Ana Patrícia Malva da Costa

Mestrado em Engenharia Agronómica

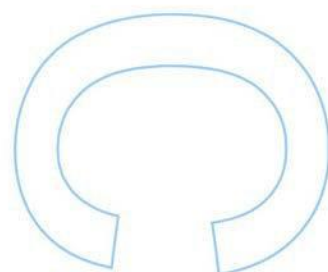
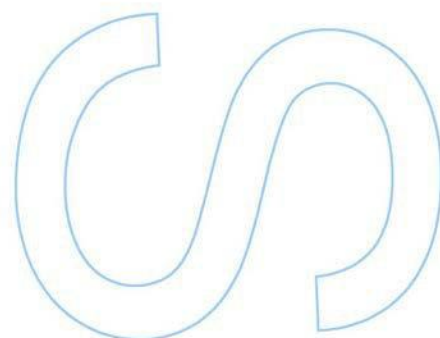
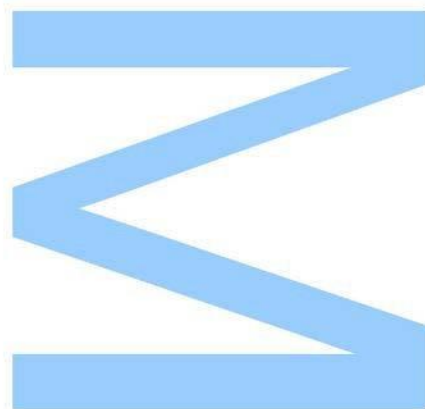
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2014

Orientador

Mário Campos Cunha, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências

Coorientadora

Isabel Maria Poças, Colaboradora externa, Centro de Investigação em
Ciências Geo-Espaciais



Na elaboração desta dissertação utilizaram-se dados constantes do seguinte trabalho publicado com autoria de Costa, P.M.:

Costa, P.M.; Poças, I.; Alves, S; Pereira, M.; Carvalho, S.M.P. e M. Cunha, M. 2014. Estimativa da área foliar em diferentes estados fenológicos baseada em descritores alométricos de rosas de corte cv 'Red Naomi'. Livro de atas, VI Jornadas Ibéricas de Horticultura Ornamental, 1 a 3 de Outubro, Valência, Espanha. 7p.

Agradecimentos

Um sincero agradecimento a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Mário Campos Cunha pelo seu entusiasmo e paixão pela Agronomia, pela disponibilidade e pela partilha do seu conhecimento.

À Doutora Isabel Maria Alves Poças pelos ensinamentos transmitidos, pelo incentivo, pela disponibilidade e por todo o apoio prestado.

À Professora Susana Carvalho pela bibliografia dispensada.

Ao Engenheiro Sérgio Alves, por permitir a realização deste trabalho na sua empresa – FlorAlves.

Aos funcionários da empresa FlorAlves, pela simpatia e disponibilidade em ajudar.

À Sara Gonçalves e Manuela Pereira pela ajuda prestada na recolha de dados.

Ao projeto FCT EXPL/AGR-PRO/1559/2012 “AGRISAT_XXI”, intitulado “AGRISAT_XXI - Que nos pode dizer a deteção remota sobre a dinâmica dos ecossistemas agrícolas. Um olhar para o futuro” pela atribuição de bolsa de investigação à autora. Esta bolsa foi suportada pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), programa COMPETE e fundos nacionais da FCT-Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

A todos aqueles que me incentivaram e que desta forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial ao Domingos pelo apoio incondicional, sem o qual não seria possível vencer este desafio.

Resumo

A evapotranspiração é um parâmetro imprescindível na gestão da rega das plantas cultivadas em diferentes ambientes. A complexidade das metodologias atualmente disponíveis para culturas em estufa torna a sua aplicação em contexto operacional limitada, pelo que se torna importante o desenvolvimento de modelos expeditos e de fácil aplicabilidade.

Neste trabalho estudaram-se algumas metodologias utilizadas na monitorização da rega de culturas em estufa, tendo-se procurado atenuar algumas das suas insuficiências. Neste contexto foram desenvolvidos modelos que permitiram aumentar a eficiência da programação da rega através do sensor de radiação e da evapotranspiração da cultura. Foram ainda testadas metodologias para apoio à gestão da rega com recurso a imagens de termografia. O plano de trabalhos teve como base alguns estudos feitos em estufa e ainda algumas metodologias que aplicadas noutras culturas poderão permitir a sua aplicação para culturas em estufa.

Sendo assim foi desenvolvido um modelo de estimativa de evapotranspiração diária em roseiras cultivadas em substrato com base num conjunto reduzido de parâmetros, nomeadamente a área foliar das hastes, o número de folhas do “pulmão” da cultura e humidade relativa.

A metodologia de programação de rega baseada unicamente na determinação da radiação acumulada, através de um sensor de radiação situado no exterior da estufa, mostrou ser pouco rigoroso já que em cerca de 63% das situações testadas os valores de drenagem ficaram fora do intervalo de valores de drenagem preconizado (35 a 45%). Partindo deste estrangulamento desenvolveu-se um modelo que integrou outras variáveis biofísicas para além da radiação acumulada. O modelo de determinação da radiação acumulada desenvolvido que integra a área foliar da cultura (parte ascendente e descendente) e a temperatura, revelou-se rigoroso e preciso. O modelo estimado apresentou um R^2 de 0,78 ($n=136$; $p<0,000$) e um desvio médio relativo entre dados observados e modelados de 4%. A validação do modelo através de técnicas de validação externa e cruzada teve um desvio médio relativo de 5% entre ambos os casos o que indicia uma boa capacidade preditiva do modelo.

Para a obtenção da área foliar das hastes das plantas foi desenvolvido um modelo matemático, cujo coeficiente de determinação obtido da comparação da área foliar estimada com a observada foi de 0,94, o que demonstra o bom desempenho do modelo.

A evapotranspiração cultural diária foi determinada diretamente através de um lisímetro de carga, o que permitiu o desenvolvimento de um modelo que integrou variáveis climáticas e culturais. Os resultados obtidos através do modelo de estimação da evapotranspiração cultural apresentaram

uma elevada correlação com os dados observados e estimados ($R^2 = 0,88$, $n=33$). O modelo estimado apresentou um R^2 de 0,90 ($n=33$; $p<0,000$) e um desvio médio relativo entre dados observados e modelados de 10%. A validação externa do modelo teve um desvio médio relativo de 13%.

As metodologias apresentadas demonstraram capacidade de aplicabilidade em roseiras cultivadas em substrato, indicando a possibilidade da sua eventual utilização em contextos de produção comercial.

Palavras-chave: roseira, rega, modelação da evapotranspiração, lisímetros, solarímetros, termografia, área foliar, parâmetros climáticos.

Abstract

Evapotranspiration is an essential parameter in the irrigation management of plants grown in different environments. The complexity of the various models currently available for use in greenhouses cultures makes its application limited in operational context, so it is necessary to develop models that are practical and user friendly.

The present study investigated some of the methodologies for monitoring irrigation crops in greenhouses, trying to ease some of its shortcomings. In this context models were developed that increased the efficiency of irrigation scheduling by radiation sensor and by determining the crop evapotranspiration. Methodologies to support irrigation management were also experienced using thermographic images. The work plan was based on a few studies done in greenhouses and even some methodologies applied in other cultures may allow its application to greenhouse crops.

In this context a model for estimation of daily evapotranspiration in cultivated roses in hydroponic system was developed based on a low number of parameters, namely the leaf area of stems, the number of leaves of the crop “lung” and the relative humidity.

The irrigation scheduling based solely on the determination of cumulative radiation, on a radiation sensor located outside the greenhouse, proved to be inaccurate since in 63% of cases tested drainage values were outside the recommended drain interval values (35 to 45%). From this restriction a biophysical model was developed that included other variables in addition to the accumulated radiation. The model developed for determining the accumulated radiation that integrates the leaf area of the plants (ascending and descending part) and the temperature, proved to be rigorous and precise. The estimated model showed an R^2 of 0.78 ($n = 136$, $p < 0.000$) and a relative average deviation between the actual and modeled data of 4%. The validation of the model through cross-validation techniques and external had a relative average deviation of 5% in both cases, indicating a good predictive capability of the model.

A mathematical model was developed in order to determine the leaf area. The determination coefficient obtained from comparison between the estimated and observed leaf area was 0.94 demonstrating a good performance of the model.

The daily crop evapotranspiration was determined directly through a load lysimeter, which allowed the development of a model that integrated climate and cultural variables. The results obtained from the estimation of crop evapotranspiration presented a high correlation model between the observed and the estimated data ($R^2 = 0.88$, $n = 33$). The estimated model showed a coefficient of determination of $R^2 = 0.90$ ($n = 33$; $p < 0.000$) and a relative average deviation between the observed

and modeled data of 10%. The external validation of the model had a relative average deviation of 13%.

The methodologies presented demonstrated ability for application on the production of roses grown in hydroponic system, indicating the possibility of its eventual use in the context of commercial production.

Keywords: rose, irrigation, modelling evapotranspiration, lysimeters, solarimeters, thermography, leaf area, climatic parameters.

Índice

I. INTRODUÇÃO	1
II. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	3
1. Características gerais da cultura	3
1.1. Botânica da roseira	3
1.2. Fenologia da roseira	4
2. Cultivo da roseira em substrato.....	5
2.1. Tipos de substrato.....	6
2.2. Gestão da fertirrigação.....	7
3. Monitorização e programação da rega no cultivo em substrato.....	8
4. Determinação das necessidades hídricas	14
5. Modelação da evapotranspiração	18
5.1. Fatores que determinam a evapotranspiração	18
5.2. Evapotranspiração em estufas.....	20
5.3. Modelação de evapotranspiração em estufas	21
III. MATERIAIS E MÉTODOS	25
1. Local de estudo.....	25
2. Caracterização e gestão do sistema da rega	26
3. Monitorização dos parâmetros ambientais	30
4. Monitorização dos parâmetros relacionados com a cultura	31
4.1. Medição da área foliar da cultura	31
4.2. Medições com a câmara térmica.....	34
5. Determinação da evapotranspiração cultural	35
6. Modelação dos parâmetros biofísicos e programação da rega.....	38
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
1. Uniformidade do sistema de rega.....	41
2. Modelos de estimativa da área foliar com base em descritores alométricos.....	42
2.1. Estimativa da área da folha	42
2.2. Estimativa da área foliar da haste	45
3. Avaliação do desempenho dos lisímetros de carga na determinação das dotações e respetivas drenagens	47
4. Modelação da programação rega através do sensor de radiação em função de parâmetros climáticos e culturais	51
5. Evapotranspiração da roseira e coeficiente cultural ao longo do período experimental	59
6. Modelo de estimativa da evapotranspiração da roseira em função de parâmetros climáticos e culturais.....	62

7. Monitorização da temperatura da canóia e relação com a evapotranspiração da cultura ...	65
V. CONCLUSÕES	69
Referências bibliográficas	71

Lista de quadros

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas dos substratos.....	7
Tabela 2. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.....	17
Tabela 3. Classificação da uniformidade da distribuição (UD) do sistema de rega.....	27
Tabela 4. Medidas alométricas obtidas para o modelo de estimação da área das folhas.....	31
Tabela 5. Uniformidade da distribuição dos sectores A, B, C e D e sua classificação no período de inverno e de verão.....	41
Tabela 6. Estatísticas dos parâmetros, teste de ajustamento e de diagnóstico e validação do modelo de estimativa da área foliar.....	44
Tabela 7. Estatísticas dos parâmetros, teste de ajustamento e de diagnóstico e validação do modelo de estimativa da área foliar da haste.....	46
Tabela 8. Estatísticas de comparação entre as dotações e drenagens observadas e determinadas através do registo do lisímetro de carga com o dreno aberto.....	48
Tabela 9. Estatísticas de comparação entre as dotações e drenagens observadas e determinadas através do registo do lisímetro de carga com o dreno fechado.....	50
Tabela 10. Estatísticas descritivas das variáveis consideradas para construir o modelo para estimação da radiação acumulada.....	54
Tabela 11. Estatísticas dos parâmetros, teste de ajustamento e de diagnóstico do modelo de estimativa da radiação acumulada a seleccionar para atingir um dado valor de drenagem.....	56
Tabela 12. Estatísticas de diagnóstico da validação externa e cruzada do modelo de estimativa da radiação acumulada.....	58
Tabela 13. Valores de défice de pressão de vapor (DPV) das unidades de amostragem (UA) B, C e D nos dias 19 e 20 de agosto e 13 de setembro de 2014.....	62
Tabela 14. Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na obtenção do modelo de estimação da evapotranspiração cultural diária (ETCd).....	63
Tabela 15. Estatísticas dos parâmetros, teste de ajustamento e de diagnóstico do modelo de estimativa da evapotranspiração cultural.....	64
Tabela 16. Dados de temperatura do ar e défice de pressão de vapor (DPV) registados nos sectores A/B e C/D da estufa em dois períodos distintos do dia 20/08/2014.....	68
Tabela 17. Valores do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para as unidades de amostragem do sector A (UA1, UA2, UA3) nos dias 23 de janeiro, 21 de fevereiro, 7 de março e 21 de abril de 2014.....	76

Lista de figuras

Figura 1. Saco com substrato e 4 plantas e com 1 gotejador por planta.	26
Figura 2. Localização na estufa dos sectores em estudo e respetivas unidades de amostragem e dos sensores de monitorização ambiental.	28
Figura 3. Lisímetro de drenagem ou volumétrico onde é possível ver a malha metálica que suporta o saco com o substrato e as plantas.	29
Figura 4. Aquisição de imagem das folhas das roseiras sobre superfície branca com escala e quatro marcas de referenciação espacial, cobertas com placa acrílica.	33
Figura 5. Imagem térmica da canópia de uma roseira de uma unidade de amostragem (A) e do interior da estufa (B).	34
Figura 6. Esquema de um lisímetro de carga (A) e imagem de um lisímetro de carga (estrutura metálica do lisímetro e a plataforma monocélula que a suporta) (B).	35
Figura 7. Layout do programa concebido para a aquisição de dados de 5 balanças em simultâneo. Exemplo com intervalos de monitorização de 5 s.	36
Figura 8. Registo obtido pelo lisímetro de carga da variação de massa na unidade de amostragem devido à rega e drenagem, com o ponto de início da rega (M1), do final da rega (M2) e do final da drenagem livre (M3).	37
Figura 9. Comparação dos coeficientes de variação dos sectores de rega A, B, C e D.	42
Figura 10. Comparação da área foliar (AF) obtida através do método destrutivo (Medidor de AF, AM350; ADC BioScientific) e método não destrutivo (Imagem digital tratada em Photoshop).	43
Figura 11. Comparação entre os valores observados e os valores estimados de área foliar (AF) através de: (A) regressão linear com reta de identidade e (B) frequência de classes de desvios. ..	45
Figura 12. Comparação entre os valores observados e os valores estimados da área foliar (AF) da haste através de: (A) regressão linear com reta de identidade e (B) frequência de classes de desvios.	47
Figura 13. Comparação dos volumes da dotação da rega observados e obtidos pelo lisímetro de carga.	48
Figura 14. Relação entre os valores de radiação acumulada e drenagem observada em cada sector, durante o período de julho e setembro (n=99).	52
Figura 15. Tendência linear e quadrática da variação da radiação acumulada no período de julho a setembro (n=149).	55
Figura 16. Comparação entre os valores de radiação observados e estimados pelo modelo.	57
Figura 17. Reta de regressão entre valores observados e estimados da radiação acumulada (RADa) da série de estimação (A) e da série de validação cruzada (B). Coeficiente de determinação (R^2) e declive da reta.	58
Figura 18. Evolução diária da evapotranspiração cultural (ETc), da temperatura e humidade relativa no interior da estufa ao longo de um dia nublado (A e C) e de um dia com sol (B e D) de uma unidade de amostragem do sector C.	60
Figura 19. Evolução da (A) evapotranspiração cultural (ETc) e do (B) coeficiente cultural (Kc) de uma unidade de amostragem do sector B, C e D nos dias 19 e 20 de agosto e 13 de setembro de 2014.	61
Figura 20. Comparação entre os valores observados e os valores estimados da evapotranspiração cultural (ETc) diária através de: (A) regressão linear com reta de identidade e (B) frequência de classes de desvios.	64
Figura 21. Temperatura da canópia (lado esquerdo) e evapotranspiração cultural (ETc) (lado direito) para os sectores A (A e B), B (C e D), C (E e F) e D (G e H) para os períodos entre as 12.30-13.30h e 17-18h.	67

Lista de abreviaturas

A, B - Coeficiente empírico
 AF – Área foliar
 AH - Altura da haste
 ATF - Área total dos folíolos de cada folha
 CF - Comprimento da folha
 C_p - Calor específico do ar
 CV – Coeficiente de variação
 CWSI - *Crop Water Stress Index*
 DE - Comprimento dos entrenós
 DPV – Défice de pressão de vapor
 DREN - Drenagem do sector
 E - Taxa de transpiração da cultura
 e_a - Pressão de vapor real
 EB - Estado do botão floral
 ECA -Evaporação do tanque Classe A
 e_s - e_a - Défice de pressão de vapor
 e_s - Pressão de vapor de saturação
 ET – Evapotranspiração
 ET_c – Evapotranspiração cultural
 ET_{Cd} – Evapotranspiração cultural diária
 ET_o – Evapotranspiração de uma cultura de referência
 FDR - *Frequency Domain Reflectometry*
 FP- Número de folhas do pulmão
 G - Fluxo de calor do solo
 H10 - Humidade relativa média entre o final da drenagem da última rega e as 21:00h
 H2 - Humidade relativa média entre as 06:00h e a primeira rega
 Hd - Humidade relativa média diária
 Hdmin -Humidade relativa diária mínima
 Hdmax -Humidade relativa diária máxima
 IAF – índice de área foliar
 IV- Índice de vegetação
 k - Coeficiente da intercepção da luz específico da cultura
 K_c – Coeficiente cultural

Kcb - Coeficiente cultural basal
 Kce - Coeficiente de extinção da radiação,
 Ke - Coeficiente de evaporação do solo
 K_t - Fator de conversão das unidades (igual a 3600 sh⁻¹)
 LF - Largura da folha
 MAD - Desvio médio absoluto
 n - Insolação ou horas de sol
 NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*
 NF -Número de folíolos
 NFH - Número de folhas da haste
 PFa – Posição da folha em altura na haste
 PFn - Posição numérica da folha na haste
 P-Pressão atmosférica média diária
 PRFa – Posição relativa da folha na haste
 PRFn - Posição numérica relativa da folha na haste
 R² - Coeficiente de determinação
 r_a - Resistência aerodinâmica
 RAD - Desvio médio relativo
 RADa- Valor de radiação acumulada
 RADa_*dtrended* - Radiação acumulada corrigida da sua tendência temporal
 RADa_*obs* - Radiação acumulada observada no sensor
 r_c - Resistência da canópia
 R_{int} - Radiação intercetada pela vegetação
 RMSE - Raiz quadrada do erro quadrado médio
 R_n - Radiação líquida na superfície da cultura
 R_{ns} - Radiação líquida de curto comprimento de onda
 r_R - Resistência radiativa
 R_s - Radiação solar a nível do solo
 s - Declive da curva de pressão de vapor
 SAAF- Sistema de aquisição da área foliar
 SE - Estimativa do erro padrão da amostra de regressão
 SECT – Sector da estufa
 T - Temperatura média diária
 T – Valor de tolerância
 T- Temperatura média diária ((T_{dmax}+T_{dmin})/2)
 T1 - Temperatura média durante o período compreendido entre as 00:00h e as 06:00h

T10 – Temperatura média entre o final da drenagem da última rega e as 21:00h

T11 - Temperatura média entre as 21:00h e 00:00h

T2 - Temperatura média entre as 06:00h e a primeira rega

Td - Temperatura média do dia

Tdmax – Temperatura máxima diária

Tdmin- Temperatura mínima diária

TDR - *Time Domain Reflectometry*

Tm -temperatura média mensal observada no mês em estudo

T_o - Temperatura da folha

u₂ -Velocidade média do vento diária medida a 2 m de altura

UD - Uniformidade da distribuição

v- Velocidade do vento

VIF – Valor do fator de inflação da variância

γ - Constante psicrométrica

Δ - Declive da curva de pressão de vapor

θ - Teor volumétrico de água

ρ - Densidade atmosférica média

σ - Constante de Stefan-Boltzman

Ψ_m - Potencial matricial do substrato

I. INTRODUÇÃO

Na produção agrícola a água constitui um fator limitante, pelo que a sua correta gestão é essencial para a obtenção da máxima produtividade com o mínimo impacto ambiental. No sector florícola, assim como nos demais sectores agrícolas, o conhecimento rigoroso das necessidades hídricas das culturas é portanto indispensável para um uso eficiente dos recursos hídricos.

Em Portugal, nos últimos dez anos, tem-se vindo a registar um aumento da área de produção de culturas florícolas, estando atualmente cerca de 41% desta área orientada para a produção de flores de corte. Nas flores de corte a rosa assume uma posição de destaque, tendo em 2012 ocupado 11% de toda a superfície produtiva, apesar do decréscimo da sua área de produção nos últimos dez anos (INE, 2013).

O cultivo da rosa de corte é muito exigente no que respeita à aparência final do produto, não devendo estas apresentarem defeitos, deformações ou problemas fitossanitários resultantes de práticas culturais incorretas como uma gestão da rega ineficiente. Uma sobrestimação das necessidades de rega na cultura compromete não apenas a sua produtividade e qualidade, devido ao risco do deficiente arejamento do sistema radicular, mas conduz inevitavelmente ao desperdício de recursos hídricos com um consequente aumento de custos a nível da produção. Por outro lado, uma rega deficitária pode facilmente conduzir a uma situação de défice hídrico, que se traduzirá numa redução da evapotranspiração da cultura, na produção de biomassa e, geralmente, da produtividade. Neste contexto, um dos pré-requisitos para uma gestão eficiente do uso da água de rega na produção de rosas é pois a correta determinação das suas necessidades hídricas.

Atualmente na produção de rosas predomina o sistema de cultivo em substrato. Esta mudança deveu-se principalmente às necessidades de aumento de produtividade e diminuição do impacto das doenças (Raviv and Lieth, 2008). No sistema de cultivo em substrato a gestão da água de rega torna-se particularmente pertinente. Não tendo o substrato a capacidade de tamponamento do solo e, sendo o seu volume reduzido, a resposta da cultura a erros técnicos é mais rápida podendo resultar em inevitáveis perdas na produção.

A gestão convencional da rega implica um elevado risco de erro dado que a maioria dos produtores fornece água em excesso às suas culturas, acautelando desta forma eventuais falhas no sistema (Jones, 2008) ou o défice hídrico nas plantas. Para além disso, muitos produtores ainda fazem a gestão da rega com base em critérios subjetivos que falham no objetivo de satisfazer as necessidades hídricas das suas culturas. Contudo, esta situação não se coaduna com uma correta gestão de um sistema de produção agrícola ou com uma gestão sustentável dos recursos hídricos pelo que estes procedimentos apresentam, sem dúvida, margem para melhoria.

Nas situações onde metodologias mais rigorosas são adotadas a gestão pode ser efetuada com base na monitorização do teor de humidade do solo, ou substrato, recorrendo a sensores (e.g. tensiómetros, sondas TDR (*Time domain reflectometry*) ou através da radiação, onde um valor pré-estabelecido de acumulação de radiação determina o início da rega, sendo que este último se destaca por ser um dos mais utilizados na programação de rega do cultivo em substrato (Meric et al., 2011). A monitorização das plantas constitui uma outra alternativa de gestão de rega, sendo esta baseada na medição direta e indireta do estado hídrico da planta ou nas respostas fisiológicas desta ao défice de água (Jones, 2004). Um outro tipo de metodologia consiste na estimativa da evapotranspiração com base em modelos matemáticos que integram parâmetros ambientais e da cultura.

No entanto, a monitorização da cultura e do seu ambiente implica o recurso a sensores que acarretam por vezes um elevado investimento inicial, para além de que a sua correta utilização e manutenção requer, geralmente, um elevado grau de conhecimentos científicos por parte dos seus utilizadores e a determinação de ajustamentos que permitam a sua operacionalidade em situações concretas.

Melhorar a gestão da rega, através da determinação precisa das necessidades hídricas das plantas, deve significar não apenas a aplicação das técnicas atualmente disponíveis, mas também o desenvolvimento de novas metodologias que permitam estimativas mais precisas e que possam ser aplicadas pelos agricultores de uma forma operacional.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo dinâmico e expedito para estimar a evapotranspiração cultural da roseira, em cultivo sem solo, com base em parâmetros ambientais e da cultura. Os objetivos específicos que estão relacionados com a conceptualização, operacionalidade e fiabilidade de equipamentos e metodologias, foram delineados para:

- Testar a adequabilidade de diferentes equipamentos e metodologias para determinação das necessidades hídricas e respetiva gestão da rega em roseiras produzidas em sistema de cultura sem solo.
- Avaliar o contributo de dados obtidos por deteção remota com sensores de proximidade para a estimativa da evapotranspiração de uma cultura em estufa;
- Contribuir para o desenvolvimento de um sistema integrador do conhecimento produzido que permita a automatização da programação de rega.

II. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

1. Características gerais da cultura

1.1. Botânica da roseira

O género *Rosa* pertence à família Rosaceae e inclui entre 100 a 200 espécies, arbustivas ou trepadeiras, nativas do hemisfério norte, sendo a maioria proveniente de regiões temperadas. A sua distribuição geográfica inclui a área desde o círculo polar até ao Novo México, Etiópia, Himalaias, Bengala e o sul da China no Extremo Oriente. A rosa moderna e a grande maioria das espécies do género *Rosa* pertencem a um dos quatro subgéneros, o *Eurosa*. De acordo com Haynes (2012) o grupo das rosas modernas são as cultivares introduzidas após 1867, ano em que foi introduzida o primeiro “Híbrido-de-chá”. Das muitas espécies do género *Rosa* apenas oito contribuíram para a obtenção da rosa moderna e, consequentemente, das cultivares que atualmente se utilizam em floricultura, tendo a introdução na Europa, no final do século XVIII, da *R. chinensis* e *R. gigantea*, provenientes do Extremo Oriente, dado um grande contributo para o seu desenvolvimento, ao permitir a floração contínua das mesmas. Contudo a hibridação ao longo de séculos tornou quase impossível a sua distinção das espécies selvagens (Hoog, 2001).

A roseira é uma planta perene, arbustiva, com caules que após o período de crescimento lenhificam, possuindo nos seus caules estruturas rígidas e pontudas de origem epidérmica, os acúleos. As folhas da roseira são de inserção alterna, compostas, imparipinuladas, geralmente com três, cinco ou sete folíolos serrados, de forma ovada e elíptica, embora algumas cultivares apresentem um número superior de folíolos (American Rose Society, 2011), e com estípulas aderentes ao pecíolo. A sua folhagem é na maioria dos casos caduca. As hastes, ramos herbáceos resultantes do crescimento dos gomos axilares, apresentam diferentes tipos de folha. Percorrendo a haste no sentido da base podemos observar uma pequena folha rudimentar com o limbo inteiro e de forma alongada. Seguem-se uma ou duas folhas trifoliadas após as quais surgem as folhas com cinco ou sete folíolos. Junto à base da haste voltam a surgir as folhas trifoliadas e após estas uma ou duas folhas rudimentares (Mercurio, 2007).

As flores apresentam-se solitárias ou agrupadas em inflorescências terminais do tipo corimbo. As sépalas, pétalas, pistilo e estames encontram-se nos limites e interior de um receptáculo em forma de taça, cuja cavidade contem numerosos ovários. A corola primitiva da flor da roseira é pentâmera, como ainda é possível observar em espécies selvagens, contudo existe uma espécie com quatro pétalas, a *R. omiensis*. Contudo as cultivares atuais, resultantes de séculos de seleção e melhoramento genético, apresentam flores constituídas por numerosas pétalas, em que apenas

cinco são consideradas pétalas verdadeiras, sendo as restantes estames modificados (Manners, 2011).

Os frutos são aquénios inclusos num hipanto carnudo, que quando maduro assume uma cor amarela, laranja, vermelha ou até preta, dependendo da cultivar. Esta estrutura é muito valorizada em termos nutricionais devido ao seu elevado teor em vitamina C (Mercurio, 2007).

As cerca de 20 mil cultivares que existem atualmente podem ser distinguidas pelas características morfológicas como a sua cor, forma e posição das sépalas, forma das pétalas, forma do botão, forma da flor aberta, entre outras características (Hoog, 2001). Segundo uma das classificações funcionais de uso agronómico, o principal grupo de cultivares produzidas para flor de corte é o “grupo dos Híbrido-de-chá”, cujas roseiras apresentam uma natureza remontante e, geralmente, possuem flores grandes e solitárias. Para além deste grupo, destacam-se ainda as rosas do “grupo das Floribunda”, cujas plantas apresentam um porte baixo, flores em corimbo e floração abundante, razões pelas quais são muito utilizadas nos jardins, e do “grupo das Grandiflora”, cujas flores em corimbo apresentam um menor tamanho e maior compactação do que as anteriores (Yong, 2004).

1.2. Fenologia da roseira

A roseira é uma planta perene com indução floral própria e sem necessidade de estímulos externos para passar da fase vegetativa à fase reprodutiva (Vásquez, 2010). Com a produção contínua de novas hastes florais, é expectável a observação na mesma cultura dos diferentes estados de desenvolvimento da planta, desde do abrolhamento de gomos axilares, responsáveis pela formação da estrutura arbustiva da planta e produção das hastes florais, até hastes prontas a serem colhidas (Hoog, 2001).

A fase da diferenciação floral ocorre assim que as hastes apresentam alguns centímetros de comprimento (Brun and Mary, 2003). A temperatura exerce pouca influência na iniciação da floração da roseira, sendo esta também indiferente ao fotoperíodo (Hoog, 2001).

Segundo Caceres et al. (2003), citado em Rodríguez & Flórez (2006), o ciclo de desenvolvimento de uma haste floral da roseira prolonga-se em média por 11 a 12 semanas, sendo que metade deste período é de crescimento vegetativo e o restante reprodutivo. O período vegetativo da roseira decorre desde o abrolhamento do gomo axilar ao desenvolvimento da haste, apresentando as folhas, na maioria dos casos, uma coloração avermelhada.

O período reprodutivo tem início com a indução do primórdio floral, assumindo as folhas uma coloração verde, seguindo-se os seguintes estados fenológicos (Caceres et al., 2003 citado em Rodríguez & Flórez, 2006):

- Estado "arroz", em que o botão floral apresenta um diâmetro inferior a 4 mm;
- Estado "ervilha", em que o botão floral apresenta um diâmetro de 5 a 7 mm;
- Estado "grão-de-bico", em que o botão floral apresenta um diâmetro de 8 a 12 mm;
- Estado "cor raiada", em que é possível observar a cor das pétalas;

- Estado "corte". Esta fase corresponde à colheita, fase em que a flor se caracteriza por apresentar abertura que é avaliada do ponto de vista comercial e não fisiológico.

Existem diversas escalas fenológicas cuja estrutura e desenvolvimento evolui de acordo com a orientação predominante da sua funcionalidade, agronómica, ornamental, comercial entre outras. A explicação detalhada destas escalas fenológicas sai fora do âmbito deste trabalho e a sua consulta por ser feita em diferentes publicações (e.g. Meier et al., 2009).

2. Cultivo da roseira em substrato

O surgimento de diversos sistemas de cultivo sem recurso ao solo, originou uma controvérsia no que respeita à sua correta classificação, nomeadamente no que respeita à ambiguidade de alguns termos como “cultivo hidropónico”, que pode ser utilizado, consoante os autores, no seu sentido restrito (cultivo em solução nutritiva) ou lato (cultivo sem recurso a solo) (Reis, 2014).

Sendo assim considerou-se que o cultivo sem solo se divide em dois grupos: cultivo hidropónico (cultivo efetuado com solução nutritiva sem recurso a um meio sólido de suporte) e cultivo em substrato (cultivo de plantas num meio sólido de suporte e regado por uma solução nutritiva) conforme defendido pelos seguintes autores (Savvas et al., 2013; Reis, 2014).

O cultivo sem solo mais comum, de um ponto de vista comercial é o cultivo em substrato (Pardossi et al., 2011), servindo este de meio de suporte da cultura. Na produção de plantas dentro recipientes como vasos, sacos ou calhas, o desenvolvimento das suas raízes é limitado. Sendo assim as exigências relativamente ao substrato, onde a cultura é efetuada, são muito maiores, ao contrário do que acontece no cultivo em solo.

No cultivo hidropónico destaca-se a (i) técnica de filme de nutrientes (NFT) onde as plantas crescem tendo o sistema radicular em permanente contacto com um filme de solução nutritiva; (ii) a

aeroponia, onde as plantas geralmente apoiadas pelo colo do sistema radicular exibem as suas raízes suspensas, sendo estas pulverizadas periodicamente com solução nutritiva; e (iii) a técnica da plataforma flutuante, onde as plantas são ancoradas numa plataforma que flutua sobre a solução nutritiva, ficando o sistema radicular parcial ou totalmente submerso nesta. Apesar dos sistemas de cultivo em meio líquido serem recorrentemente usados em trabalho de pesquisa, são contudo pouco expressivos a nível comercial, com a exceção da técnica da plataforma flutuante (Pardossi et al., 2011).

2.1. Tipos de substrato

A seleção do tipo de substrato a utilizar no cultivo de roseiras deve ter em conta um conjunto de parâmetros, inerentes ao próprio substrato, onde se incluem (Mercurio, 2007): a ausência de elementos tóxicos e patogénicos; uma relação água/ar equilibrada; uma distribuição uniforme da água; inércia térmica adequada ao tipo de cultura, valores de pH entre os 5,0-6,5 e condutividade elétrica muito baixa e garantia da estabilidade das propriedades físicas e químicas (Tabela 1) ao longo de todo o ciclo de cultura. Contudo fatores como o preço, disponibilidade, facilidade de processamento após o seu uso, durabilidade e serviço prestado pelo fornecedor também devem ser tidos em conta aquando da tomada de decisão. Dos parâmetros mencionados deve-se ter particular atenção à ausência de elementos tóxicos e patogénicos no substrato e às suas características físicas e químicas (Mercurio, 2007). A distribuição de ar e água no substrato é também bastante importante visto ser vital que as raízes tenham acesso a água e oxigénio em quantidades adequadas (Hoog, 2001) evitando-se os riscos de asfixia e morte radicular ou reduzida disponibilidade hídrica.

No cultivo de rosas podemos recorrer a diversos tipos de substrato que se incluem em dois grupos, os substratos inorgânicos e os orgânicos. No primeiro grupo inclui-se a lã de rocha, perlite, pedra-pomes, rochas vulcânicas (Mercurio, 2007) e grânulos de argila, embora estes últimos estejam a cair em desuso (Hoog, 2001). O substrato inorgânico mais utilizado é a lã de rocha que apresenta uma boa capacidade de retenção de água, boa relação água/ar e estabilidade da sua estrutura durante o cultivo. Contudo a lã de rocha liberta água muito facilmente e a sua estrutura pode ser facilmente afetada quando o pH é inferior a 5,2 (Hoog, 2001; Mercurio, 2007). Este substrato apresenta ainda como desvantagem o facto de se tornar num resíduo de difícil processamento após o término do período de cultivo. No que respeita aos substratos orgânicos estes incluem a turfa, fibra de coco, fibra de madeira, pó e fragmentos de coco. Alguns destes substratos têm uma elevada capacidade de retenção de água, como a turfa, mas também são facilmente degradados (Fascella and Zizzo, 2005) como as fibras de madeira, o que resulta no desenvolvimento de microrganismos

que competem com as plantas (Hoog, 2001). A mineralização da fração orgânica destes substratos podem dar origem a nutrientes para as plantas.

Existem ainda substratos disponíveis que resultam da mistura em diferentes proporções de materiais orgânicos e inorgânicos. Estes substratos de composição muito variável apresentam propriedades intermédias aos referidos anteriormente.

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas dos substratos.

	Propriedade	Caracterização	Valor de referência
Físicas	Capacidade de retenção de água	Quantidade de água que o substrato consegue reter após a drenagem.	35-50% do volume do substrato*
	Porosidade	Totalidade de espaço não ocupado por partículas sólidas após secagem.	50%-85% do volume do substrato
	Capacidade de arejamento	Quantidade de ar presente no substrato após a sua saturação em água e posterior drenagem.	20-30% do volume do substrato
	Densidade aparente	Razão entre a massa seca e volume do substrato húmido.	Entre 190-700 Kg/m ³
Químicas	pH	Influencia na disponibilidade dos nutrientes no substrato.	5,0-6,5
	Capacidade de troca catiónica	Representa a habilidade do substrato em reter ou absorver os iões positivos.	6- 15 meq/100g*
	Relação carbono/azoto	Indicativo do grau de estabilidade do substrato orgânico.	Mínimo de 50-80*
	Salinidade	Indicativo do conteúdo de sais na solução do substrato.	200-400 µS*

*Valor de referência para roseiras (Adaptado de Cadahía, 2005; Mercurio, 2007; Pardossi et al. 2011).

2.2. Gestão da fertirrigação

O conhecimento das necessidades nutritivas da roseira permite fornecer a dosagem correta dos nutrientes à cultura. Para tal é necessário ter conhecimento da fenologia da cultura ao longo do seu ciclo de cultivo, já que as necessidades nutritivas variam em função desta. Deste facto resulta um ritmo descontínuo de absorção de nutrientes que deverá ser refletido no plano de fertilização da cultura (Cadahia, 2005).

No cultivo em substrato, quando comparado com o cultivo em solo, o volume que a raiz pode ocupar e a quantidade de nutrientes disponíveis para a planta é limitado. Sendo assim as culturas deverão ser regadas frequentemente de modo a evitar que se esgotem os elementos consumidos em maior quantidade, como o azoto ou o potássio, e a garantir a satisfação das necessidades hídricas da cultura.

De modo a evitar a acumulação de sais e a corrigir diferenças no que respeita ao conteúdo em água no substrato, resultado das diferenças de plantas individuais a nível da transpiração, é necessário proceder à lavagem do substrato através da aplicação de rega em excesso. O aumento de concentração de sais no substrato, tal como no solo, implica uma diminuição do seu potencial osmótico. Como consequência, o efeito da salinidade sobre os cultivos é semelhante a uma situação de défice hídrico que tem como reflexo inicial uma diminuição do crescimento da cultura (Villalobos et al., 2009)

3. Monitorização e programação da rega no cultivo em substrato

Uma programação de rega apropriada é fundamental para que uma cultura tenha acesso oportuno à quantidade de água de que necessita; para além disso, uma correta gestão da rega contribui também para a manutenção da fitossanidade e produtividade da cultura (NSW, 2009b). Para Hoog (2001) a frequência diária de rega de culturas em substrato não deve ser inferior a 5-6 regas, incluindo dias com baixa radiação, podendo este número atingir as 30-35 vezes em dias com elevada radiação.

Segundo o NSW (2009b), as necessidades nutricionais e hídricas das plantas alteram-se ao longo do dia, pelo que a rega se deve adaptar a estas mudanças. Como tal, poderão ser considerados diferentes períodos de rega ao longo do dia nomeadamente: (i) o período da manhã, onde as regas devem ser frequentes, de forma a repor cerca de 10 % do conteúdo de água do substrato e a atingir a fração de drenagem (volume drenado/volume solução nutritiva x 100) definida para a cultura; (ii) o período que inclui a parte final da manhã e o início da tarde, onde as regas deverão ser feitas de modo a manter o valor de electrocondutividade definido para a solução drenada, através da gestão da fração de drenagem; (iii) o período da tarde, onde as regas deverão permitir manter a fração de drenagem pretendida e (iv) o período após o final das regas, onde se permite que o substrato perca cerca de 10 % do seu conteúdo em água.

Neste contexto a fração de drenagem assume um importante papel. Para além de permitir a gestão da electrocondutividade da solução drenada, a fração de drenagem pode ser usada para controlar a quantidade de água aplicada ao substrato (Cayanan, 2009).

No que respeita à percentagem de drenagem recomendada para o cultivo de rosas a maioria dos produtores de rosas em substrato rega com 30-50% de fração de lavagem (Raviv and Blom, 2001). Hoog (2001) defende que para o cultivo de rosas é desejável uma elevada percentagem de drenagem, nomeadamente 50%. Contudo, segundo Mercurio (2007) os valores da drenagem variam

geralmente entre 10-40% durante o ciclo de cultivo, dependendo de fatores como a variação sazonal e o estado vegetativo e sanitário da cultura.

A programação de rega permite decidir quando e que quantidade de água se deve fornecer à cultura, de forma a controlar o estado hídrico da mesma e, por conseguinte, o seu desempenho. Para tal existe uma grande variedade de métodos de programação de rega, onde se incluem os métodos empíricos, em que o agricultor faz a gestão da rega com base na sua experiência e geralmente recorrendo ao aspeto das plantas, e os métodos que implicam o recurso a equipamentos diversos (e.g., sensores de radiação e sensores relacionados com teor de humidade no substrato), bem como preparação técnica e científica para a sua aplicação (Villalobos et al., 2009).

Nos sistemas de cultivo sem solo, como o cultivo em substrato, a rega é geralmente automatizada devido à necessidade de elevada frequência de regas (Pardossi et al., 2011). O recurso a substratos com uma baixa capacidade de retenção hídrica para permitir uma drenagem adequada, implica a adoção de um sistema automático cuja eficiência está muito dependente do rigor da avaliação da evapotranspiração (ET; ver secção seguinte) e da sua sensibilidade às suas variações num curto período. Desta forma evita-se que as culturas sejam sujeitas a estresse hídrico ou que sejam feitas regas desnecessárias que implicam gastos evitáveis de água e fertilizantes (Suay et al., 2003) e que provocam asfixia radicular das plantas devido ao insuficiente arejamento do substrato (Kittas et al., 2005). Contudo em muitas zonas do mediterrâneo sul a maioria dos produtores continua a gerir os sistemas de rega com base em critérios pessoais e subjetivos (Fascella et al., 2010).

Existem diversos métodos para automatização da rega, que se baseiam em observações/medições no solo (ou no substrato), nas plantas e em parâmetros ambientais. No entanto alguns destes processos de decisão têm ainda carácter experimental sendo a sua eficácia e operacionalidade ainda pouco conhecidas.

Segundo Medrano et al. (2003), citado em Castilla (2012) os métodos mais comuns de gestão da rega em substrato incluem a medição da tensão ou potencial matricial da água no substrato e o uso de sensores de nível de solução, em tabuleiros que servem de suporte a várias unidades de substrato. Estes sensores são responsáveis por acionar a rega quando o nível da solução diminui abaixo de um valor pré-estabelecido. Segundo o mesmo autor, os lisímetros de carga, a monitorização contínua da drenagem, a determinação do teor volumétrico de água (θ) (por exemplo através de sífoes) e o recurso a modelos de estimação da ET são métodos que têm vindo a expandir-se. No entanto o controlo da drenagem é frequentemente a única referência para a gestão da rega. Apesar de ser possível utilizar diferentes sensores na programação de rega, o sensor de radiação é actualmente o mais utilizado no cultivo sem solo (Meric et al., 2011).

De seguida apresenta-se uma breve descrição dos principais métodos de programação de rega.

Observação das plantas e do substrato

Este processo empírico recorre a diferentes descritores para fundamentar a decisão de regar ou não regar, sendo os mais frequentemente usados a observação da planta e ou do substrato. Segundo Raviv and Lieth (2008) este processo implica uma observação cuidada da planta, nomeadamente no que respeita à presença de folhas murchas e à coloração das folhas, dado que em algumas culturas a alteração da cor antecede o seu emurchecimento. A cor da superfície do substrato é também outro fator a ter em atenção aquando da aplicação deste método. O método pode dar bons resultados à medida que o operador vai adquirindo experiência, contudo a avaliação pode ser muito subjetiva, sobretudo quando a informação é recolhida por diferentes operadores. Por outro lado, esta abordagem não permite determinar a quantidade a regar, i.e., as necessidades efetivas de água da cultura. Para além das limitações anteriormente referidas o método apresenta a grande desvantagem de não permitir a automatização (Jones, 2008).

Método de variação de massa de água

Este método baseia-se na utilização de sensores de carga como forma de determinar a quantidade de água perdida através da evapotranspiração, uma vez conhecida a diferença de peso ocorrida entre regas (Raviv and Lieth, 2008). Determinada a transpiração e atenuado o fluxo de evaporação, recorrendo por exemplo ao *mulching*, o substrato pode ser mantido a um nível pré-determinado de peso (Raviv and Blom, 2001). Desta forma é possível manter uma elevada frequência de regas durante o período do dia em que a procura evaporativa é alta e uma frequência de regas mais baixa no período em que procura evaporativa é menor. Este método apresenta ainda como vantagens o facto de permitir uma medição rigorosa da transpiração da cultura e ser passível de ser automatizado. A variação do peso fresco das plantas e a monitorização da transpiração podem ainda ser usados pelo produtor para avaliar o estado da cultura.

Contudo a gestão desta metodologia tem de ter em conta o desenvolvimento da planta. Dado que o volume de água disponível para as plantas diminui à medida que estas se desenvolvem, os níveis pré-determinados para que a rega ocorra têm de ser reajustados regularmente ao longo do tempo. Este facto constitui uma desvantagem para os produtores, no que respeita ao trabalho exigido na sua gestão (Raviv and Lieth, 2008).

Todavia, é expectável que a variação da biomassa num dado período possa ser conhecida através do sensor de carga. Embora a bibliografia não permita esclarecer a exequibilidade deste sistema, este método poderá constituir uma mais-valia para a monitorização da rega em culturas em substrato.

Método do horário fixo

Neste método, o produtor recorre a um temporizador para programar a rega, decorrendo as regas num horário pré-definido, constituindo este o mais simples e económico método de automatização da rega (Raviv and Lieth, 2008). Segundo Van Iersel et al. (2006), citado em Cayan, (2009), este método não permite uma adaptação à mudança das condições meteorológicas ou de desenvolvimento da cultura, tendo o produtor de proceder a ajustamentos, pelo que uma abordagem exclusivamente baseada num horário fixo pode levar com frequência a níveis desajustados de água no substrato (Raviv and Lieth, 2008).

Método baseado em sensores de humidade

Os sensores de humidade podem ser usados para determinar a frequência e até a dotação da rega a aplicar a uma cultura (Pardossi et al., 2011) através da monitorização constante do teor volumétrico de água (θ) ou do potencial matricial (Ψ_m) do substrato. Para tal pode-se definir dois valores de θ ou Ψ_m , sendo que o menor valor determina o início da rega e o maior o seu término. Para o cultivo em substrato os valores de Ψ_m variam entre -1 kPa e -10 kPa (Raviv and Blom, 2001), sendo aconselhável regar quando o potencial chega aos -5 kPa (Raviv and Lieth, 2008).

Segundo Raviv & Lieth (2008), no cultivo sem solo pode recorrer-se a diferentes tipos de sensores de humidade, tais como os sensores de resistência elétrica, tensiómetros e sensores TDR (Time Domain Reflectometry) e FDR (Frequency Domain Reflectometry), sendo que os dois primeiros medem o Ψ_m e os últimos o θ do substrato. No que respeita ao seu desempenho, os sensores de resistência elétrica apresentam uma resposta muito lenta às frequentes alterações das condições de humidade para além de que são sensíveis à salinidade e temperatura do substrato, pelo que não são recomendáveis em situações onde a precisão e rapidez de ajustamento sejam necessárias. São contudo os mais acessíveis em termos económicos.

Os tensiómetros e os sensores TDR e FDR apresentam maior fiabilidade, precisão e durabilidade. Contudo apresentam também algumas desvantagens como a sua manutenção (tensiómetros), o custo e sensibilidade à salinidade (TDR e FDR) (Raviv and Blom, 2001). No caso dos sensores TDR e FDR é ainda necessário proceder à sua calibração para cada tipo de substrato

(Raviv and Lieth, 2008). Acresce ainda que os sensores de humidade não têm em conta a procura evaporativa pelo que não são capazes de antecipar o estresse hídrico das plantas (Jones, 2008).

Num estudo realizado por Oki et al. (2001) onde se utilizou tensiómetros para o controlo da rega de rosas envasadas, concluiu-se que mantendo a tensão da água entre -1 e -5 KPa foi possível consumir menos 26% de água do que a utilizada pelo produtor, sendo que a produtividade na área de teste foi 67% superior à do produtor.

Método baseado no sensor de radiação

Devido à forte relação entre a radiação e a taxa de transpiração das plantas, a gestão da rega em estufas é frequentemente feita com um recurso a um sensor de radiação. Este método baseia-se no somatório de valores de radiação, num determinado intervalo para dar início a uma rega com um caudal previamente determinado. Sempre que um determinado valor previamente definido de radiação acumulada for atingido, a rega é iniciada (Raviv and Lieth, 2008).

Dado que a taxa de transpiração das plantas é fortemente influenciada pela radiação, esta metodologia permite ao produtor adquirir maior precisão na rega no que respeita à adequação da sua programação às necessidades hídricas da cultura. Contudo este método apresenta algumas desvantagens como o facto de não funcionar bem em situações de baixa luminosidade ou grandes variações temporais da nebulosidade, não ter em conta fatores ambientais (nomeadamente em estufas com aquecimento artificial), não considerar parâmetros culturais como a área foliar e não permitir regas durante a noite (Cayanan, 2009).

Métodos baseados em parâmetros das plantas

Os métodos baseados em medições dos parâmetros das plantas também podem ser usados para a gestão da rega, contudo não são geralmente usados em estufas comerciais (Castilla, 2012). Alguns parâmetros das plantas que apresentam potencialidade para funcionar como indicadores de quando se deve regar são o potencial hídrico da folha, a resistência estomática, o fluxo de água no caule e as variações cíclicas do diâmetro do caule (Jones, 2004; Raviv and Blom, 2001), cavitação do xilema (detecção acústica de bolhas de ar no xilema), emurchecimento da folha, taxa de crescimento ou a temperatura da canópia (Jones, 2004).

A abordagem através da temperatura da canópia baseia-se na premissa de que a temperatura da folha está relacionada com o nível de estresse hídrico da planta. À medida que os estomas das folhas fecham e a transpiração diminui, devido ao estresse hídrico, o excesso de energia não utilizada

nos fluxos de calor sensível e latente provocam um aumento da sua temperatura. Deste modo o aumento de temperatura pode ser usado como um indicador do estresse hídrico (Jones, 2008; Villalobos et al., 2009).

Os termómetros de infravermelhos ou as câmaras térmicas são dois tipos de instrumentos que podem ser usados na medição remota da temperatura da canóia. Contudo as imagens térmicas que registam a temperatura convetiva apresentam como vantagens a possibilidade de eliminar eventuais influências provenientes do meio circundante (e.g. temperatura do solo), para além de permitirem a recolha de dados de áreas de maior dimensão.

Segundo Villalobos et al. (2009) o método CWSI (*Crop Water Stress Index*) é atualmente a abordagem baseada na temperatura da canóia mais viável para a programação de rega. Este método, desenvolvido por Idso et al., (1981), conforme citado por Jones (2004), baseia-se na diferença entre a temperatura da canóia e a temperatura ambiente e na temperatura de um cultivo bem regado e em estresse hídrico. O CWSI assume valores entre 0 (cultura sem estresse hídrico) e 1 (cultura sujeita a estresse hídrico máximo), sendo a cultura regada quando o CWSI atinge o valor aproximado de 0,25 (Villalobos et al., 2009). Esta abordagem apresenta como limitação o facto de ser menos adequada em regiões com climas húmidos e na presença de nuvens.

A monitorização de vegetação pode também ser realizada através do recurso a índices de vegetação devido à sua relação com parâmetros biofísicos das plantas. Estes resultam da combinação da reflectância, obtida através de um espectralradiómetro, em dois ou mais comprimentos de onda, geralmente na zona do visível, associados a uma propriedade particular de vegetação.

Os índices de vegetação (IV) desenvolvidos permitem monitorizar o estado das culturas (e.g. *Normalized Difference Vegetation Index*-NDVI), a sua área foliar, a sua fenologia, o estresse hídrico das plantas, entre outros parâmetros. Dadas as características de absorção e reflexão da água nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, do espectro eletromagnético, foram desenvolvidos IV capazes de traduzir o estado hídrico das culturas (Genc et al., 2013). Todavia, a utilização destes métodos apresenta ainda limitações para serem desenvolvidos em estufas devido à parametrização da radiação direta e difusa que atravessa a cobertura, nomeadamente devido às variantes de materiais utilizados e/ou às práticas culturais que alteram a sua transmissividade (e.g. caimento). Por outro, lado embora possam identificar um estresse é ainda difícil perceber as suas causas bióticas ou abióticas (e.g. estresse hídrico).

No entanto dos métodos anteriormente referidos apenas alguns têm potencial para serem usados em estufas comerciais, como métodos auxiliares, nomeadamente o fluxo de água no caule e a alteração do diâmetro do caule (Jones, 2004; Raviv and Blom, 2001). Contudo segundo Raviv and

Blom (2001) estes métodos não são recomendados para o controlo da irrigação pois apesar de serem capazes de identificar situações de falta de água antes de se verificar qualquer sintoma externo na planta, a sua resposta é, por agora, ainda muito lenta.

Segundo Jones (2004) a automatização da rega com base em parâmetros da cultura está ainda em desenvolvimento devido em parte à necessidade de obter informação suplementar, como por exemplo a ET. Só assim é possível construir um sistema de controlo, em tempo real, onde a rega é controlada pelos sensores que monitorizam a cultura.

Modelos de estimação da Evapotranspiração

Modelos matemáticos de diferente complexidade têm sido desenvolvidos para estimar a ET. Deste modo é possível determinar a quantidade de água que a cultura utilizou num determinado período procedendo posteriormente à sua reposição através da rega.

A aplicação de modelos para estimação da ET é desenvolvida em detalhe na secção seguinte.

4. Determinação das necessidades hídricas

As necessidades hídricas de uma cultura são a quantidade de água que é necessário fornecer à cultura para que esta mantenha um nível máximo de evapotranspiração (Villalobos et al., 2009) ou no caso de culturas sem solo, como o cultivo em substrato, da sua transpiração (Raviv and Lieth, 2008). Como tal, a necessidade hídrica de uma cultura, inserida num determinado ambiente e sujeita a determinadas práticas culturais, corresponde à sua demanda evaporativa (Pereira, 2004). Pelo que a sua determinação é fundamental para uma gestão eficiente da rega (Bacci et al., 2011).

A evapotranspiração (ET) das culturas é o resultado da combinação de dois processos que, embora distintos, são simultâneos, a evaporação da água da superfície do solo, substrato ou planta e a transpiração da cultura. Apesar de a água ser responsável por 85% a 95% do peso fresco das plantas, sendo indispensável para o seu crescimento e arrefecimento, mais de 95% de toda a água absorvida por estas regressa à atmosfera através da transpiração (Uno et al., 2001).

No que respeita à ET podemos distinguir diferentes conceitos entre os quais a de evapotranspiração cultural (ET_c), que representa a evapotranspiração de uma dada cultura, num dado período do seu desenvolvimento (Oliveira, 2011) e a evapotranspiração potencial que corresponde à ET_c à taxa máxima, ou seja a ET de uma cultura em desenvolvimento que não está

exposta a qualquer efeito de estresse como por exemplo o provocado por défice de água ou ataque de doenças ou pragas.

A ET pode ser obtida por medição direta ou pode ser estimada através de modelos matemáticos baseados em parâmetros meteorológicos e culturais. Entre os numerosos métodos que permitem determinar diretamente a ET da cultura destaca-se o recurso a lisímetros que são inseridos na cultura. Estes, ao serem instalados na área de cultivo, isolam uma determinada área em estudo, da cultura que a circunda, permitindo deste modo a medição direta das entradas e saídas de água avaliadas através do volume ou massa. Nos lisímetros de carga ou de pesagem a ET é determinada pela variação de massa entre cada rega, depois de cessar a drenagem. Estes equipamentos são geralmente rigorosos, permitindo a determinação da ET em contínuo e em períodos curtos.

Um outro importante método de medição direta da ET é o balanço hídrico, o qual exige a determinação dos fluxos de entrada (precipitação, rega, ascensão capilar) e saída (ET, drenagem, escoamento superficial) de volume de água no solo/substrato num determinado período de tempo. A utilização desta metodologia em culturas em substrato exige a colocação na cultura de um equipamento específico, designado lisímetro volumétrico de drenagem, que permita avaliar, num determinado período, o volume das entradas e saídas de água. Estes lisímetros volumétricos podem ser pouco rigoroso, sobretudo quando se pretendem fazer medições da variação da ET em curtos períodos.

Os métodos diretos apesar de serem mais rigorosos, são contudo dispendiosos, de difícil aplicação em algum tipo de condições e exigem muitas vezes a presença de técnicos especializados, pelo que são essencialmente usados na investigação e calibração dos métodos indiretos (Oliveira, 2011).

Dadas as dificuldades em se obter medições diretas, a ET de uma dada cultura (ET_c) é muitas vezes estimada através de métodos indiretos.

Neste sentido, foram desenvolvidos diversos métodos de determinação da ET e da ET da cultura de referência (ET_o). A ET_c é obtida através da ET_o utilizando coeficientes técnicos específicos da cultura (ver adiante). A ET_o corresponde à ET sobre uma cultura de referência, cujas propriedades do copado (e.g., altura da vegetação e resistência de superfície) e de resistência aerodinâmica são perfeitamente conhecidas, pelo que a ET_o traduz essencialmente o efeito dos fatores meteorológicos. Os diferentes métodos indiretos desenvolvidos diferem entre si não apenas no número de parâmetros a que recorrem, mas na complexidade dos mesmos (Oliveira, 2011).

Convencionalmente, a determinação da ET_o segue a metodologia FAO-Penman Monteith, descrita em Allen et al. (1998), para uma superfície relvada de referência e intervalos de tempos diários. Segundo Allen et al. (1998) a ET_o constitui a ET de uma cultura de referência hipotética

correspondente a um relvado com 12 cm de altura, com uma resistência de superfície ao transporte de vapor de água de 70 sm^{-1} e um albedo de 0,23:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

em que ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_n é a radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T é a temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a velocidade média do vento diária medida a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a é a pressão de vapor real (kPa); $(e_s - e_a)$ é o défice de pressão de vapor (kPa); Δ é o declive da curva de pressão de vapor ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Contudo esta equação é muito exigente em termos de dados, pelo que a sua aplicação não é fácil em situações em que os dados meteorológicos não estão disponíveis ou são pouco rigorosos. Como tal esta metodologia é por vezes substituída por métodos de determinação da ET_o (Tabela 2) menos exigentes em termos de variáveis de entrada, como as equações de Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985), Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972), Makkink (Makkink, 1957) de que se conhecem diferentes variantes.

Contudo, o recurso a metodologias que recorrem a menor número de variáveis de entrada pode resultar numa estimação da ET menos rigorosa (Cruz-Blanco et al., 2014).

Segundo Carvalho et al. (2011) “quando há disponibilidade de dados para o método FAO-Penman Monteith, este deve ser o recomendado como padrão, tendo em conta a sua comprovada precisão, independentemente da escala temporal e espacial. Caso contrário, deve-se averiguar um método que esteja de acordo com os dados disponíveis e se é adequado às condições climáticas do local.”

Num estudo de Fernandez et al. (2010) concluíram que a ET_o média de uma estufa de plástico em clima mediterrânico pode ser estimada através dos métodos Hargreaves, FAO Penman – Monteith, e tanque classe A. Todavia, é ainda escassa a informação sobre a adaptabilidade destes modelos para estimação da ET em culturas protegidas.

Tabela 2. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.

Método	Referência	Elementos meteorológicos de entrada ¹	Observações
Penman Monteith-FAO	(Allen et al., 1998)	Tdmax, Tdmin, T, Hd, v, n, P, Rs, Rn	Permite estimativas da ETo diárias. Pode ser ajustada para estimativas de ETo horárias.
Tanque Classe A	(Doorenbos and Pruitt, 1977)	ECA, v, Hd	As características da tina ou a sua localização podem influenciar as estimativas da ETo.
Blaney-Criddle	(Doorenbos and Pruitt, 1977)	Tm, Hdmin, n, v	Aconselhado para a estimativa da ETo em escala mensal.
Makkink	(Makkink, 1957)	Rs, P, T	—
Radiação Solar	(Doorenbos and Pruitt, 1977)	T, v, Hd, Rs, P	Também conhecido por Radiação Solar FAO 24.
Hargreaves	(Hargreaves and Samani, 1985)	T, Tdmax, Tdmin	Conhecido também por método “Hargreaves e Samani”.
Priestley-Taylor	(Priestley and Taylor, 1972)	T, P, Rn, G	-

¹ Tdmax, Tdmin e T: temperaturas diárias máxima, mínima e média ((Tdmax+Tdmin)/2), respetivamente; Hd: humidade relativa média diária; v: velocidade do vento; n: insolação ou horas de sol; P: pressão atmosférica média diária; Rs: radiação solar; Rn: radiação líquida na superfície da cultura; Tm: temperatura média mensal observada no mês em estudo; ECA: evaporação do tanque Classe A; Hdmin: humidade relativa mínima; G: fluxo de calor no solo.

Para a determinação da ETc uma abordagem convencionalmente aceite consiste na estimativa com base na ETo e num coeficiente cultural (Kc), de acordo com a seguinte equação (Allen et al., 1998):

$$ETc = Kc ETo$$

em que ETc é a evapotranspiração da cultura (mm d⁻¹); o Kc é o coeficiente cultural (adimensional) e a ETo é a evapotranspiração de referência (mm d⁻¹).

Nesta abordagem o Kc determina o efeito dos fatores relacionados com a cultura, variando o seu valor ao longo do período vegetativo desta. O Kc pode ser representado por um coeficiente único, integrando simultaneamente os efeitos de transpiração da cultura e evaporação do solo, ou considerar separadamente estes dois efeitos através de um coeficiente cultural basal (Kcb), e um coeficiente de evaporação do solo (Ke) (Allen et al., 1998). A abordagem a seguir (Kc ou Kc = Kcb+Ke) deve ter em conta a finalidade do estudo, o tipo de cultura, o rigor exigido e os dados disponíveis. Existem valores de Kc e Kcb tabelados para uma grande diversidade de culturas e condições (e.g., Allen et al., 1998; Allen and Pereira, 2009), contudo não se encontram disponíveis valores para culturas florícolas. Todavia, atendendo às características do sistema de cultura sem solo em que o substrato é geralmente envolvido numa cobertura plástica, as perdas de água por evaporação podem ser desprezível.

Sempre que as condições de cultivo limitem a evapotranspiração é necessário proceder a um ajustamento do K_c através da introdução de um coeficiente de estresse (K_s) (Allen et al., 1998).

A ETo representa o efeito dos parâmetros climáticos (radiação, temperatura, humidade e velocidade do vento) na cultura.

O facto de a ETo representar um índice climático de procura evaporativa e o K_c traduzir essencialmente as características da cultura permite que valores padrão de K_c possam ser transferidos entre diferentes regiões e climas (Allen et al., 1998; Pereira, 2004). Este facto tem contribuído muito para a aceitação global desta abordagem.

Segundo Bonachela et al. (2006, citado em Fernandez et al., 2010) apesar da metodologia descrita ter sido desenvolvida para culturas de ar livre esta também pode, potencialmente, ser aplicada em ambiente protegido.

5. Modelação da evapotranspiração

A medição da ET é essencial para uma gestão eficiente da rega, contudo a tarefa de a obter pode revelar-se difícil e dispendiosa. Num contexto prático as metodologias existentes para a sua determinação podem não ser viáveis, devido por exemplo à falta de instrumentos ou outros recursos como mão-de-obra especializada. A modelação da ET surge assim como uma alternativa à sua determinação (Farahani et al., 2007).

Também o avanço técnico e científico a nível de sensores que monitorizam o ambiente e a cultura, nomeadamente em ambientes protegidos, potenciam a modelação enquanto método acessível e económico de determinação da ET e consequentemente de gestão de rega.

5.1. Fatores que determinam a evapotranspiração

Numa abordagem simplista a evapotranspiração de uma cultura, para além da disponibilidade de água, depende da energia disponível para a vaporização da água e que são geralmente avaliados através de parâmetros meteorológicos e de parâmetros específicos da cultura que se destaca a área foliar.

Energia disponível

Para que a evaporação ocorra é necessária não apenas uma fonte de energia que possibilite a vaporização da água no estado líquido, mas também um mecanismo que remova o vapor formado

das respetivas superfícies evaporativas. A força motriz da evaporação é sobretudo a radiação solar que atinge a superfície do solo, mas também a temperatura. Contudo também o vento, a humidade relativa e o diferencial entre a pressão de vapor da superfície evaporativa e o ar circundante (défice de pressão de vapor) constituem importantes parâmetros a considerar aquando da determinação da evaporação (Allen et al., 1998).

A transpiração, tal como a evaporação, também depende da energia disponível para a vaporização da água, do diferencial de pressão de vapor assim como da remoção do vapor das cavidades estomáticas. Pelo que a sua determinação deve ter em conta os parâmetros ambientais anteriormente referidos. A temperatura da canópia tem também um efeito importante, embora indireto, na taxa de transpiração dado que influencia o déficit de pressão de vapor (DPV) (Raviv and Blom, 2001). A transpiração é ainda influenciada por fatores inerentes à própria cultura para além das condições ambientais a que cultura está exposta e as práticas culturais a que é sujeita.

A ET é portanto determinada não apenas por parâmetros meteorológicos, mas também por parâmetros inerentes à própria cultura. No que respeita aos parâmetros culturais estes incluem diversas características da cultura como o tipo de cultura, a variedade, o seu estado de desenvolvimento, a sua área foliar, entre outras. Os fatores de natureza ambiental, tais como a salinidade ou conteúdo em água do solo, e a gestão do processo de produção (e.g. tipo de método de rega) também influenciam a taxa de ET, pelos que deverão ser considerados aquando da sua determinação (Allen et al., 1998).

Área foliar

A área foliar é um parâmetro determinante em muitos processos de natureza fisiológica e agronómica, onde se incluem a transpiração. Pelo que diversos modelos têm sido propostos para a estimar, baseando-se em medições diretas (geralmente destrutivas) ou indiretas das plantas. Contudo o facto de as rosas, ao contrário da grande maioria das culturas, estarem a ser constantemente colhidas faz com que estas exibam uma grande variação na sua superfície transpirante ao longo do ciclo de cultivo. Por este motivo este parâmetro deve ser tido em consideração aquando do desenvolvimento de qualquer modelo que estime a sua transpiração. Segundo (Bacci et al., 2011) a ET de plantas cultivadas em recipientes depende não apenas dos fatores ambientais e da cultura mas também do tipo e da quantidade de substrato em que esta se desenvolve.

5.2. Evapotranspiração em estufas

As estufas proporcionam a oportunidade de modificar os elementos climáticos na zona protegida e, consequentemente, a resposta fisiológica das culturas. O microclima no interior das estufas difere do clima exterior num conjunto de fatores, entre os quais se destacam a irradiância na canópia, a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do vento. Da interação destes fatores advém, habitualmente, uma diminuição da ET das culturas. Segundo Viana et al. (2001) citada em Oliveira et al. (2014) a ET em ambiente protegido é geralmente cerca de 60 a 80% da verificada exteriormente. A redução do movimento do ar no interior de uma estufa diminui a ET o que resulta no aumento da temperatura da cultura e consequentemente na estufa. O aumento da humidade relativa do ar constitui um fator restritivo da ET.

No que respeita à importância dos fatores ambientais na procura evaporativa em ambiente protegido (Farias et al., 1994) concluíram que a ET no interior de uma estufa de plástico é, em geral, menor do que a verificada no seu exterior devido essencialmente à parcial opacidade da cobertura plástica à radiação solar e à redução do vento.

Na zona mediterrânica as culturas protegidas, quando comparadas com culturas de ar livre regadas, apresentam um valor de ET_c substancialmente mais baixo devido à reduzida procura evaporativa no interior da estufa. Este facto é atribuído não apenas à diminuição da radiação solar no interior das estufas (cerca de 40% em média) mas também à redução da velocidade do vento que chega a atingir valores de $0.1-0.3 \text{ m s}^{-1}$ ou inferiores (Gallardo et al., 2013). O défice de pressão vapor (DPV) também influencia fortemente a transpiração das culturas, assumindo particular importância durante as noites de inverno em que se recorre ao aquecimento da estufa e em dias nublados (Suay et al., 2003). Contudo é inegável a importância da radiação na demanda evaporativa. De facto vários autores verificam a existência de uma forte relação entre a radiação e a transpiração das culturas de ambiente protegido (Katsoulas and Kittas, 2011).

Num estudo realizado sobre a ET da roseira cultivada em ambiente protegido no Brasil, Oliveira et al. (2014) verificaram que a temperatura do ar não influenciou, de forma concreta, a ET potencial até 213 dias após a transplantação. Este facto corrobora, segundo o autor, a ideia de que a temperatura não influencia grandemente a ET. Os autores verificaram ainda que a ET potencial das roseiras foi inicialmente de $0,62 \text{ mm d}^{-1}$, 120 após a transplantação, tendo-se verificado o valor máximo de cerca de 3 mm d^{-1} durante o ciclo de cultura, que durou um ano.

5.3. Modelação de evapotranspiração em estufas

Alguns autores demonstraram que é possível estabelecer-se uma relação entre a ET e parâmetros da cultura, como a altura das plantas ou o índice de área foliar (Suay et al., 2003; Pivetta, 2007) e com parâmetros meteorológicos (Pivetta, 2007; Oliveira et al., 2014). Neste contexto a modelação surge como uma ferramenta facilitadora na gestão da rega em estufas e na tomada de decisões ao longo do desenvolvimento da cultura.

Enquanto método de estimativa da ET os modelos apresentam diversas vantagens. Se por um lado permitem a gestão diária da rega de uma cultura, por outro também podem ser úteis em simulações que permitam definir melhores e novas estratégias de gestão da rega (Bacci et al., 2011). Para estes autores os modelos de simulação podem ainda servir de “sensor” do estado da cultura, dado que uma redução da ET real da cultura, medida através de métodos diretos, relativamente à ET estimada pode ser indicadora da alteração da condição hídrica das plantas.

Diversos estudos têm-se focado na determinação da ET de culturas em estufa (Katsoulas and Kittas, 2011), dos quais resultou o desenvolvimento de modelos de estimativa de ET de diferente complexidade (Bacci et al., 2011). Nestes estudos, a ET tem sido determinada essencialmente através do método Penman-Monteith (Katsoulas and Kittas, 2011; Takakura et al., 2009), apesar de este ter sido inicialmente desenvolvido e aplicado na estimativa da ET de culturas de ar livre. No entanto, o recurso ao método de Penman-Monteith implica a aquisição e determinação de um conjunto de parâmetros e variáveis de entrada que nem sempre são facilmente obtidas, como o valor da resistência aerodinâmica e estomática, que são específicas da cultura e de cada cultivar (Moura et al., 2010; Katsoulas and Kittas, 2011).

Dentro dos modelos desenvolvidos especificamente para condições de estufa, tendo por base o método Penman Monteith, destacam-se os de Stanghellini (1987) e Finn (1993), citados em Ilahi (2009).

O modelo de Stanghellini (1987) é determinado através das equações:

$$ET_o = 2 IAF \frac{1}{\lambda} \left[\frac{s (R_n - G) + K_t \left[\frac{DPV \rho C_p}{r_R} \right]}{s + \gamma [1 + r_c / r_a]} \right] \text{ em que}$$

$$R_n = \frac{0.07 R_{ns} - 252 \rho C_p (T - T_0)}{r_R}, \text{ sendo } R_{ns} = 0.77 R_s$$

$$r_R = \frac{\rho C_p}{4\sigma (T + 273.15)^3}$$

em que ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}) usando como cultura de referência uma cultura de tomate; R_n é a radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); T é a temperatura média diária a uma altura de 2m ($^{\circ}\text{C}$); K_t é o fator de conversão das unidades (igual a 3600 sh^{-1}); DPV é o défice de pressão de vapor (kPa); ρ é a densidade atmosférica média (kg m^{-3}), C_p é o calor específico do ar ($\text{MJ kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$), r_R é a resistência radiativa (s m^{-1}), r_c a resistência da canópia (s m^{-1}); r_a é a resistência aerodinâmica (s m^{-1}); λ é o calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}); s é o declive da curva de pressão de vapor ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); R_{ns} é a radiação líquida de curto comprimento de onda ($\text{MJ m}^2 \text{dia}^{-1}$); R_s é a radiação solar ao nível do solo ($\text{MJ m}^2 \text{dia}^{-1}$); T é a temperatura horária ou diária média do ar ($^{\circ}\text{C}$); T_o é a temperatura da folha ($^{\circ}\text{C}$); σ é a constante de Stefan-Boltzman ($\text{MJ m}^{-2} \text{K}^{-4} \text{dia}^{-1}$) e IAF o índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

Segundo Ilahi (2009) o modelo de Stanghellini é preciso na estimação da ET de estufas de alta tecnologia, ou seja, estufas geralmente fechadas, onde o ambiente é controlado.

Por sua vez, a estimativa da ET_c através do modelo de Fynn (1993) é obtida por:

$$ET_c = \frac{2 \text{ IAF } \rho C_p (e_a^* - e_a) / r_e + \delta (R_n - G)}{\lambda \gamma r_i}$$

em que ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); R_n é a radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); ρ é a densidade atmosférica média (kg m^{-3}), C_p é o calor específico do ar ($\text{MJ kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e_a^* é a pressão de vapor saturado à temperatura média do ar (Pa); e_a é a pressão de vapor do ar (Pa); λ é o calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); r_e é a resistência externa da canópia ao calor sensível (s m^{-1}); r_i é a resistência interna da canópia e IAF o índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

Nos modelos propostos por Stanghellini (1987) e Finn (1993) referidos anteriormente o índice de área foliar (IAF) é um fator considerado. Este fator é particularmente relevante na modelação da ET em culturas que estão constantemente a ser colhidas, como é o caso da rosa. Neste tipo de culturas há grande variação na área foliar e portanto da superfície transpirante.

Metodologias mais simples para estimativa da ET em função de parâmetros como IAF, a radiação intercetada pela vegetação (R_{int}) ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$) ou o DPV (kPa) foram também desenvolvidas (Bacci et al., 2011):

$$ET_c = A \frac{R_{int}}{\lambda} + B \cdot IAF \cdot DPV$$

$$R_{int} = 1 - \exp^{-k \cdot IAF}$$

Em que A (adimensional) e B ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{kPa}^{-1}$) são coeficientes empíricos, k um coeficiente da interceção da luz específico da cultura e λ o calor latente da vaporização da água ($2,45 \text{ MJ m}^{-2}$). Após calibração adequada este método permitiu a estimativa da ET com precisão para várias culturas de estufa, onde se inclui a rosa (Bacci et al., 2011; Pardossi et al., 2011).

Num estudo de medição e estimação da transpiração de rosas em cultivo sem solo, Suay et al. (2003) concluíram que um modelo baseado numa equação simplificada de Penman-Monteith, que utiliza como parâmetros ambientais a radiação solar externa e o DPV no interior da estufa e como parâmetro cultural o IAF, apresenta uma boa capacidade estimativa da transpiração da cultura.

O modelo presente no estudo de Suay et al. (2003) é o seguinte:

$$E = A * [1 - e^{-k_{ce} * IAF}] * G + B * IAF * DPV$$

Em que E é a taxa de transpiração da cultura ($\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$); G é a radiação solar externa (Wm^{-2}); DPV é o défice de pressão de vapor (kPa); Kce é o coeficiente de extinção da radiação, 0,64 Stanghellini (1987) citado em Suay et al. (2003); A, B são parâmetros da equação (A adimensional e B $\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{kPa}^{-1}$) e IAF é o índice de área foliar.

O modelo foi ainda capaz de reproduzir com rigor a resposta da taxa de transpiração em relação ao DPV e a radiação solar, durante o dia e a noite e apresentou um bom desempenho enquanto método de programação de rega.

Sendo a radiação solar a principal variável a influenciar a ET em estufas, sobretudo nas que não possuem aquecimento, foi também proposto o recurso a uma simples regressão linear da ET em função da radiação solar externa ou interna (Bacci et al., 2011).

Contudo a aplicação destas metodologias simplificadas apresenta limitações, como a necessidade da sua calibração para as condições climáticas locais e o estágio de desenvolvimento da cultura (Katsoulas and Kittas, 2011).

Num estudo relativo à determinação da ET numa estufa, Takakura, et al. (2009) demonstraram que o recurso à equação de balanço de energia, que é a base da metodologia de Penman-Monteith, constitui uma abordagem viável e mais simples. Este tipo de abordagem apresenta ainda potencial em termos de aplicabilidade dado o avanço tecnológico dos equipamentos que permitem obter remotamente a temperatura de superfícies.

Apesar da diversidade de metodologias de modelação da ET já existentes, há ainda necessidade de desenvolver uma metodologia simples, prática e de baixo custo que possa ser utilizada de forma robusta e consistente em diferentes ambientes de estufa. Por outro considera-se que a abordagem clássica para determinação da ET_c com base na cultura de referência não se adequa a culturas em estufa, nomeadamente a culturas em substrato. Neste sistema de cultura, contrariamente a culturas extensivas, as plantas são conduzidas dentro do seu conforto hídrico pelo que não faz sentido a comparação com uma cultura de referência que esteja nestas condições.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

1. Local de estudo

O estudo realizou-se na empresa FlorAlves, localizada na freguesia de Fajozes, concelho de Vila do Conde (41°19'40.8"N 8°42'17.4"W). A estufa de vidro onde foi realizado o estudo é do tipo “Venlo”, orientada no sentido Norte-Sul e possui cinco sectores que cobrem no seu conjunto uma área aproximada de 1 ha. A estufa é inteiramente dedicada à produção de rosa de corte (*R. hybrida* L.).

O cultivo é feito em sistema sem solo, nomeadamente em sacos de plástico branco com substrato de fibra de coco, de 21 litros de capacidade, com quatro plantas. A cultura, cuja densidade é de oito plantas por m², é regada por sistema gota-a-gota com uma solução nutritiva padrão para rosas de corte, sendo reutilizada após desinfeção com lâmpada UV. Os valores limite estabelecidos para a condutividade e pH da solução nutritiva de rega foram 1,3-1,8 dS m⁻¹ e 5,4, respetivamente.

A cultivar em estudo foi a ‘Red Naomi’, que se caracteriza por apresentar flores grandes (11 a 13 cm) de coloração vermelha e textura aveludada, tamanho da haste entre 60 a 90 cm e 10 a 14 dias de tempo de vida em jarra (Schreurs, 2014). As plantas em estudo foram transplantadas em 2011 e encontram-se distribuídas em quatro sectores da estufa.

O delineamento do ensaio consistiu em 12 unidades de amostragem, três em cada um dos sectores em estudo seleccionadas aleatoriamente. Cada unidade de amostragem (Figura 1) consistiu no conjunto de quatro plantas por saco de substrato, resultando num total de 48 plantas distribuídas por 12 unidades de amostragem. Para o estudo evitaram-se as unidades de amostragem com heterogeneidade entre plantas no saco. Cada unidade de amostragem possui equipamento diverso de monitorização de parâmetros biofísicos que serão descritos em detalhe em secção apropriada.

Atendendo a que o produtor efetuou uma colheita escalonada verificou-se uma grande variabilidade das unidades de amostragens ao nível da canópia (nº de hastes, área foliar), sobretudo entre sectores. Esta variabilidade permitiu avaliar o impacto das características da canópia na ETc de cada unidade de amostragem.



Figura 1. Saco com substrato e 4 plantas e com 1 gotejador por planta.

Todas as plantas foram cultivadas seguindo as práticas culturais padrão, recorrendo ao sistema de dobragem das hastes, apresentando estas uma produção contínua ao longo de todo o ano. Por motivos de escalonamento da produção, a cultivar em estudo foi submetida a diferentes tratamentos culturais, dos quais resultaram uma diferenciação do estado fenológico da cultivar entre os sectores. Neste estudo, as práticas culturais foram sempre determinadas pelo produtor incluindo a colheita nas unidades de amostragem. No caso da rega o produtor considerou o nível de drenagem de 40% como o mais adequado para o seu sistema de produção.

De salientar que ao longo do período de trabalho se observaram frequentes ataques de ácaros que em alguns casos tiveram impacto no vigor das plantas.

O produtor caiu a cobertura da estufa no mês de julho de forma a diminuir a radiação incidente durante o período de verão. No entanto, a distribuição da cal não foi uniforme ao longo de toda a estufa, apresentando a parte norte da estufa uma zona com pouca cal. A zona sul da estufa foi caiada algum tempo após a zona norte.

2. Caracterização e gestão do sistema da rega

O sistema de rega gota-a-gota da estufa, encontra-se dividido em cinco sectores, tendo o estudo abrangido quatro sectores a que foram atribuídos as designações: A, B, C e D (Figura 2). Os gotejadores do sistema de rega são autocompensantes e o seu débito é de 2 Lh^{-1} .

De modo a garantir que as plantas em estudo recebessem a mesma quantidade de rega procedeu-se à averiguação da uniformidade de rega dos sectores em estudo. Para tal verificou-se a dotação dos gotejadores das unidades de amostragem de cada um dos quatro sectores.

A correção da uniformidade da dotação entre sectores foi feita através do ajustamento do tempo de rega dos sectores numa pré avaliação do sistema. O controlo final da uniformidade da rega foi efetuado em dois períodos do ano: final de inverno/início de primavera (dia 10/02/2014) e de início de verão (dia 27/06/2014).

O controlo consistiu na verificação do débito (L/h) de 48 gotejadores (4 gotejadores x 3 unidades de amostragem x 4 sectores). A uniformidade da distribuição (UD) da rega de cada sector foi calculada através da seguinte equação:

$$UD (\%) = \frac{\text{Média do débito } \left(\frac{V}{t}\right) \text{ dos 25\% gotejadores com menor débito do sector}}{\text{Média do débito } \left(\frac{V}{t}\right) \text{ dos gotejadores do sector}} \times 100,$$

em que o débito corresponde ao volume recolhido (V; L) por tempo (t) de funcionamento do sistema de rega. Nestes testes o tempo de funcionamento foi de cerca de 125 a 150 segundos. Os valores dos débitos foram posteriormente corrigidos tendo como referência a hora (L/h).

Com base nos valores da UD procedeu-se à classificação da uniformidade do sistema de rega (Tabela 3), tendo como referência os valores propostos pelo NSW (2009a)

Tabela 3. Classificação da uniformidade da distribuição (UD) do sistema de rega.

Classificação	UD (%)
Excelente	90 – 100
Bom	80 – 90
Aceitável	70 – 80
Não aceitável	< 70

Fonte: NSW (2009a)

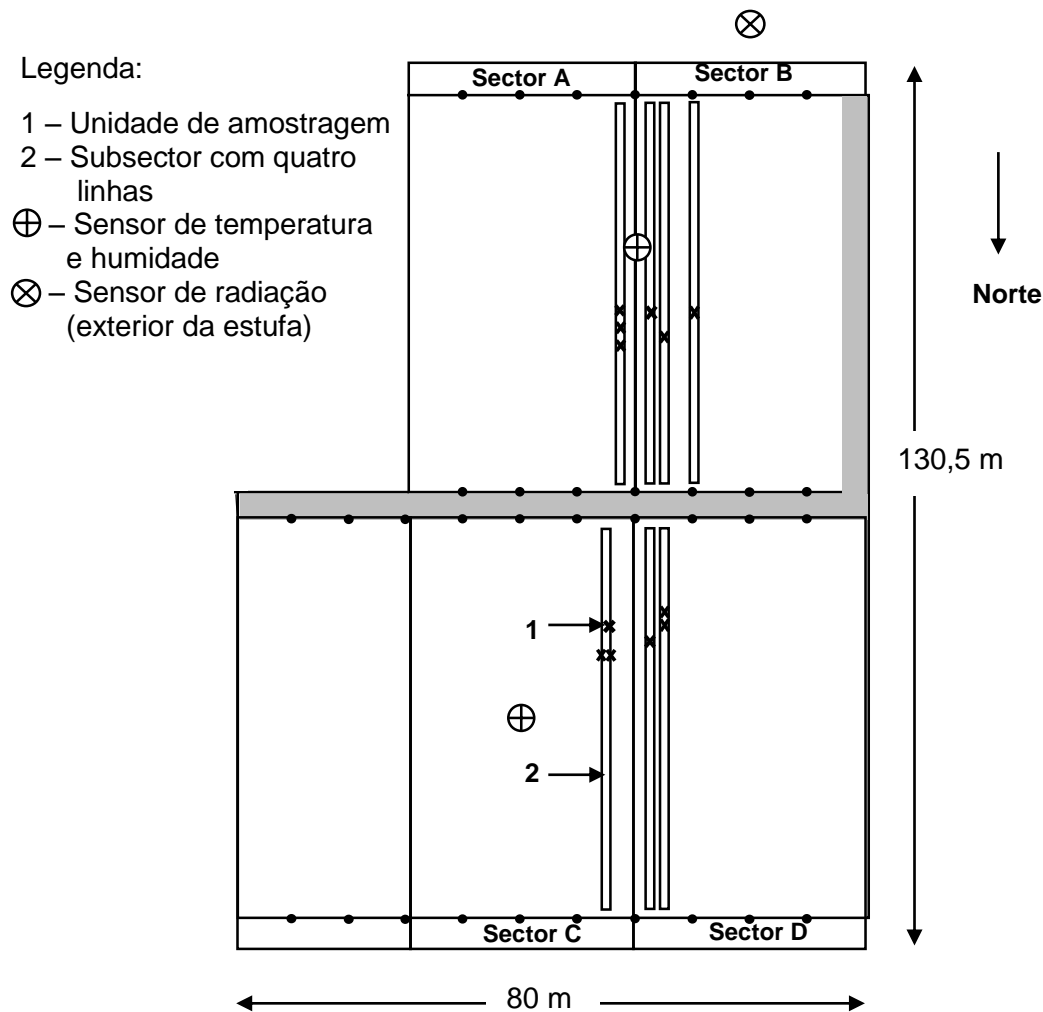


Figura 2. Localização na estufa dos sectores em estudo e respectivas unidades de amostragem e dos sensores de monitorização ambiental.

O controlo da rega durante o estudo foi realizado recorrendo a um sensor de radiação, localizado no exterior da estufa (Figura 2). A gestão do sensor de radiação foi feita através do controlo da drenagem dos sectores, tendo para isso sido estabelecido um valor objetivo de drenagem diária de 40 %, de modo a garantir o conforto hídrico das plantas. Este valor de drenagem conforme referido foi determinado pelo produtor.

A recolha dos valores de drenagem foi feita com o apoio de lisímetros de drenagem ou volumétricos (Figura 3) que consistiram num recipiente metálico retangular com as dimensões de 1 x 0,2 m, com uma estrutura de malha metálica em que assentava o saco com substrato com quatro plantas (unidade de amostragem). A drenagem do substrato foi feita através de uma perfuração na base do recipiente metálico que drenava para uma proveta graduada utilizada para fazer as medições do volume drenado.



Figura 3. Lisímetro de drenagem ou volumétrico onde é possível ver a malha metálica que suporta o saco com o substrato e as plantas.

A drenagem diária de cada unidade de amostragem consistiu na média da drenagem de cada rega efetuada em cada dia. Esta medição, realizada em três ou quatro dias da semana, permitiu não apenas definir os valores de acumulação de radiação para cada sector mas também o seu ajustamento, de forma a garantir a manutenção do valor de drenagem pré-estabelecido.

No que respeita à contabilização dos volumes de entrada de água nas 12 unidades de amostragem foi feita uma determinação indireta através do recurso a um “gotejador de referência” posicionado num saco de substrato contíguo a cada unidade de amostragem. A determinação do volume emitido pelo gotejador de referência foi efetuada recolhendo o volume emitido diretamente para um recipiente e medindo-o com o recurso a uma proveta graduada.

Uma vez conhecido o volume de solução emitida numa dada rega pelos quatro gotejadores de cada unidade de amostragem e do seu gotejador de referência passou a usar-se, em cada rega ou conjunto de regas, o volume de solução nutritiva emitida pelo gotejador de referência correspondente a cada unidade de amostragem para a determinação indireta da entrada do volume da solução nutritiva. O débito dos gotejadores de referência foram registados sempre que se procedeu à monitorização das regas.

A programação da rega através do sensor de radiação foi realizada em dois períodos distintos. O primeiro período decorreu entre os meses de fevereiro e abril de 2014, no início do qual foi necessário estabelecer um valor inicial de acumulação de radiação, tendo-se para isso recorrido a valores da bibliografia (Fascella et al., 2010; Katsoulas et al., 2006; Kittas et al., 2005). O segundo período decorreu entre julho e setembro de 2014.

Os valores de radiação acumulada selecionados no início do primeiro período de gestão da rega através do sensor de radiação tiveram como referência o valor de 500 KJ m^{-2} (140 Wh m^{-2}) (Fascella et al., 2010; Kittas et al., 2005). O valor de radiação acumulada para o início da rega do sector A foi de 300 KJ m^{-2} (83 Wh m^{-2}), para o sector B de 450 KJ m^{-2} (125 Wh m^{-2}), para o sector C

de 550 KJ m⁻² (153 Wh m⁻²) e para o sector D 650 KJ m⁻² (181 Wh m⁻²). Contudo estes valores revelaram-se muito desajustados relativamente às condições de cultivo, tendo resultando num número elevado de regas num curto espaço de tempo, quando comparado com o estipulado pelo produtor para o período do ano.

Atendendo a que os valores de radiação acumulada referidos na bibliografia, não estavam ajustados às condições, procedeu-se a um conjunto de testes para tentar determinar o aumento do valor de acumulação de radiação, de modo a que as regas permitissem obter o nível de drenagem previamente definido (40%) para os sectores. Todos os sectores foram submetidos a uma programação do sensor para atingir 40% de drenagem, pelo que se supôs que as diferenças das drenagens observadas entre unidades de amostragem se deveram às diferenças biofísicas de cada sector, nomeadamente a temperatura, humidade relativa e número de hastes, área foliar da parte ascendente e sistema de dobragem de hastes -“pulmão”- das plantas.

Nos dias nublados o produtor optou por proceder a regas extra, de modo a atingir a drenagem pré-definida. O horário das regas variou nos dois períodos anteriormente referidos, de acordo com a variação do fotoperíodo. Durante o período de fevereiro a abril o horário início das regas variou entre as 07:30 - 09:00 e terminou entre as 14:00-16:30 e durante o período de julho a setembro entre as 07:00 e as 17:30 – 18:00. O objetivo do valor de drenagem conforme anteriormente referido foi de 40%, considerando contudo como aceitáveis os valores entre os 35 e 45%.

3. Monitorização dos parâmetros ambientais

A estufa possui um sistema automático de aquisição de dados meteorológicos (computador e software de recolha de dados), de dois locais distintos da estufa: lado norte e sul (Figura 2). Foram registados os seguintes parâmetros meteorológicos com periodicidade de 1 minuto: temperatura (°C) e a humidade relativa (%) no interior da estufa no período entre junho e outubro de 2014.

O valor de déficit de pressão de vapor (DPV) para o período de 24 horas foi obtido através das medições higrométricas, conforme a metodologia descrita em (Pereira, 2004). A ETo diária foi obtida conforme Allen, et al. (1998), através do programa REF-ET (REF-ET version 3.1), considerando os dados diários de temperatura e humidade relativa registados na estufa, a radiação estimada e uma velocidade do vento de referência em condições de estufa em zonas mediterrânicas de 0,3 m s⁻¹ (Gallardo et al., 2013).

A radiação diária estimada, usada na determinação da ETo foi obtida através da diferença entre a temperatura máxima e temperatura mínima conforme a metodologia descrita em Pereira (2004).

4. Monitorização dos parâmetros relacionados com a cultura

4.1. Medição da área foliar da cultura

De modo a incorporar a área foliar (AF) da cultura no modelo de estimativa da ETc e no modelo de programação de rega através do sensor de radiação, foi necessário desenvolver uma metodologia não destrutiva de determinação da AF para a cultivar 'Red Naomi' recorrendo a um modelo matemático baseado em medidas alométricas.

Da recolha de dados realizada entre meados de março e início de maio de 2014, foi possível obter dois modelos distintos, um modelo que estima a área das folhas da cultivar 'Red Naomi' e um modelo que estima a AF das suas hastes, em diferentes estados fenológicos. As folhas consideradas para ambos os modelos eram folhas abertas com um mínimo de três folíolos.

As medidas alométricas obtidas para o modelo que estima a área das folhas encontram-se na tabela 4. Foram ainda consideradas várias transformações das variáveis alométricas, nomeadamente: $\sqrt{(CF*LF)}$, $CF*LF$, $1/CF$, $\ln(CF*LF)$, \sqrt{CF} , $\ln CF$, CF^2 .

Tabela 4. Medidas alométricas obtidas para o modelo de estimação da área das folhas.

Medida alométrica	Descrição
Comprimento da folha (CF)	Distância entre a extremidade do folíolo terminal e o ponto de interseção da folha no caule, obtida automaticamente através do processamento de imagem.
Largura da folha (LF)	Distância entre as extremidades do primeiro par de folíolos laterais abaixo do folíolo terminal obtida automaticamente através do processamento de imagem.
Posição numérica da folha na haste (PFn)	Posição da folha numerada da base para o topo da haste
Posição numérica relativa da folha na haste (PRFn)	Obtido através da divisão da posição numérica da folha pelo número total de folhas da haste, sendo este valor multiplicado por 100
Posição da folha em altura na haste (PFa)	Distância entre a base da haste e o ponto de inserção da folha na mesma
Posição relativa da folha na haste (PRFa)	Obtido através da divisão da posição em altura da folha na haste pela altura da última folha na haste, sendo este valor multiplicado por 100
Número de folíolos (NF)	Obtido pela contagem direta do número de folíolos de cada folha.
Área total dos folíolos de cada folha (ATF)	Obtida através do processamento de imagem.
Comprimento dos entrenós (DE)	Obtido através da medição distância entre folhas.

No modelo que estima a AF das hastes foram considerados os seguintes descritores:

- A altura da haste (AH), medida da sua base até ao início do botão floral. No caso das hastes sem botão floral visível a AH foi medida da base da haste até à última folha abertas da mesma;
- O número de folhas da haste (NFH), que se encontrassem nas condições anteriormente referidas, ou seja abertas e com um mínimo de três folíolos;
- O estado do botão floral (EB).

Para a construção do modelo foram consideradas três variáveis distintas relativamente ao grau de detalhe de descrição de estado do botão floral, nomeadamente EB, EB1 e EB2. Assim, cada uma das variáveis (EB, EB1 e EB2) considerou os seguintes níveis de desagregação do estado floral: (i) EB: classe 0 (haste sem botão floral) e classe 1 (haste com botão floral); (ii) EB1: classe 0 (haste sem botão floral); classe 1 (haste cujo botão floral está encerrado não permitindo verificar a cor das pétalas); classe 2 (haste com botão floral parcialmente encerrado mas permitindo verificar a cor das pétalas); classe 3 (haste cujo botão floral apresenta abertura comercial aceite para ser colhida) e (iii) EB2: classe 0 (haste sem botão floral); classe 1 (haste cujo botão floral está encerrado não permitindo verificar a cor das pétalas); classe 2 (haste com botão floral parcialmente encerrado mas permitindo verificar a cor das pétalas).

A AF foi determinada por um método baseado em imagens digitais das folhas e posterior processamento através do programa Photoshop CS6 (Adobe Systems, EU.) num sistema de processamento e obtenção de imagem especificamente desenvolvido para este efeito (SAAF-Sistema de aquisição da área foliar).

As imagens das folhas foram efetuadas com placas de suporte brancas, cobertas por um acrílico transparente para tornar a folha plana. As placas possuíam uma escala graduada e quatro marcas em cada canto de modo a formarem um paralelogramo com os ângulos retos (Figura 4). As marcações, em combinação com a grelha da máquina fotográfica, permitiram a obtenção de imagens com um maior paralelismo relativamente à placa de suporte, conferindo desta forma maior rigor à medição. O processamento das imagens incluiu três passos principais: i) a atribuição do número de pixels a 1 cm (com base na escala graduada); ii) seleção da zona da imagem cuja área se pretendeu calcular e iii) obtenção da área da zona selecionada



Figura 4. Aquisição de imagem das folhas das roseiras sobre superfície branca com escala e quatro marcas de referência espacial, cobertas com placa acrílica.

O rigor das medições obtido através do processamento imagem com o programa Photoshop CS6 foi aferido em 36 folhas nas quais se fizeram medições simultâneas da AF com imagens digitais e com um medidor de área foliar portátil AM350 (ADC BioScientific Ltd., Hoddesdon, UK).

O modelo da área da folha baseou-se num total de 176 folhas, obtidas a partir de 20 hastes, e o modelo da AF da haste num total de 26 hastes, em diferentes estados de desenvolvimento. A validação dos modelos foi posteriormente efetuada numa amostra independente de 24 folhas (cerca de 15% da amostra), no caso do modelo da área da folha, e 3 hastes (cerca de 12% da amostra) no caso do modelo da AF da haste.

Para a obtenção de um valor que quantificasse a AF das plantas recorreu-se ao modelo da AF da haste, sendo que a AF da planta resultou do somatório da AF das suas hastes. Para tal procedeu-se ao registo da altura, número de folhas e ausência ou presença de botão terminal das hastes e respetivo estado EB, EB1 e EB2, das quatro plantas das três unidades de amostragem de cada sector.

A obtenção da AF foi realizada nas semanas em que se procedeu ao registo de todas as drenagens de um ou mais dias. Nos dias após a determinação da AF nos quais se realizou o registo das drenagens do dia, apenas foi verificada a manutenção do número de hastes da planta para controlo das hastes eventualmente colhidas.

No que respeita ao “pulmão” das roseiras foi feito o registo do número de folhas expandidas. A quantificação do número de folhas do “pulmão” de cada planta foi realizada com um intervalo de aproximadamente um mês, excetuando quando se registava alterações no número de hastes que o constituíam.

4.2. Medições com a câmara térmica

Nos dias de recolha de dados das regas diárias, ocorridas no período de julho a setembro, foram adquiridas imagens térmicas da canóia (Figura 5A) de cada uma das quatro plantas existentes nas 12 unidades de amostragem. A imagem recolhida por planta abrangeu, sempre que possível, o máximo da canóia da mesma.

As imagens foram adquiridas com recurso à câmara portátil FLIR-System (ThermaCAM E300), tendo estas sido obtidas no mesmo dia entre as 12:30 e as 13:30 e as 17:00 e as 18:00.

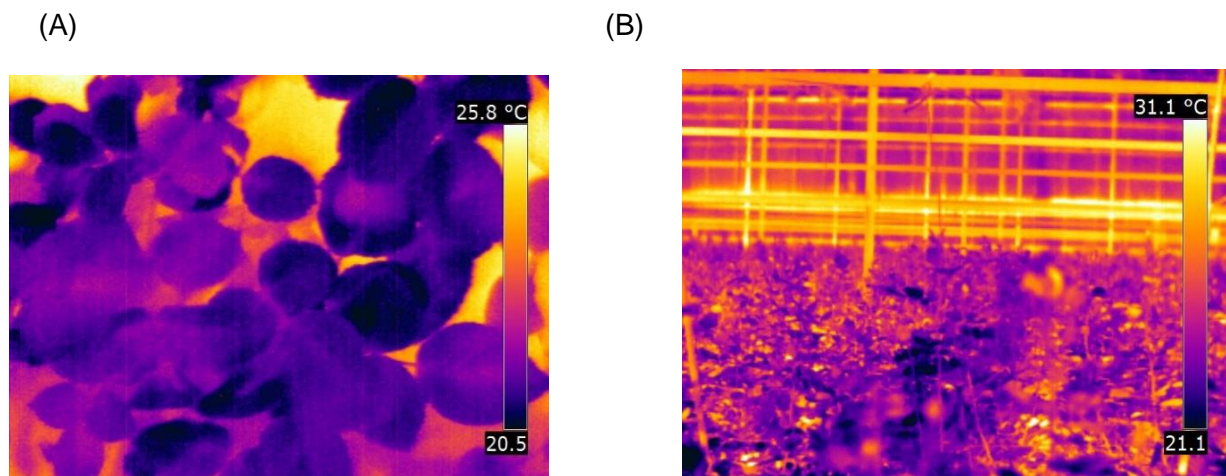


Figura 5. Imagem térmica da canóia de uma roseira de uma unidade de amostragem (A) e do interior da estufa (B).

Para se obter a temperatura da canóia procedeu-se ao processamento das imagens térmicas obtidas considerando apenas a informação obtida da folhagem evitando-se deste modo a influência de elementos do meio envolvente (Figura 5B) como elementos estruturais da estufa ou a superfície do saco onde se desenvolvem as plantas. O programa de processamento de imagem utilizado foi o Flir QuickReport 1.2.

Para a obtenção da temperatura da canóia selecionou nas imagens térmicas obtidas 5 áreas que englobassem o mais possível a folhagem das plantas. Das áreas selecionadas para cada imagem obteve-se a temperatura mínima e máxima. A temperatura média da unidade de amostragem foi obtida através da média entre o menor e o maior valor da temperatura obtido das plantas da respetiva unidade de amostragem.

Neste trabalho foi explorada a relação da temperatura da canóia das unidades de amostragem de cada sector, com a ETc obtida através dos lisímetros de carga durante o horário de recolha das imagens térmicas.

5. Determinação da evapotranspiração cultural

Durante o período de julho a outubro recorreu-se a lisímetros de carga para determinação da ETc diária, tendo em cada sector sido instalado um lisímetro (Figura 6).

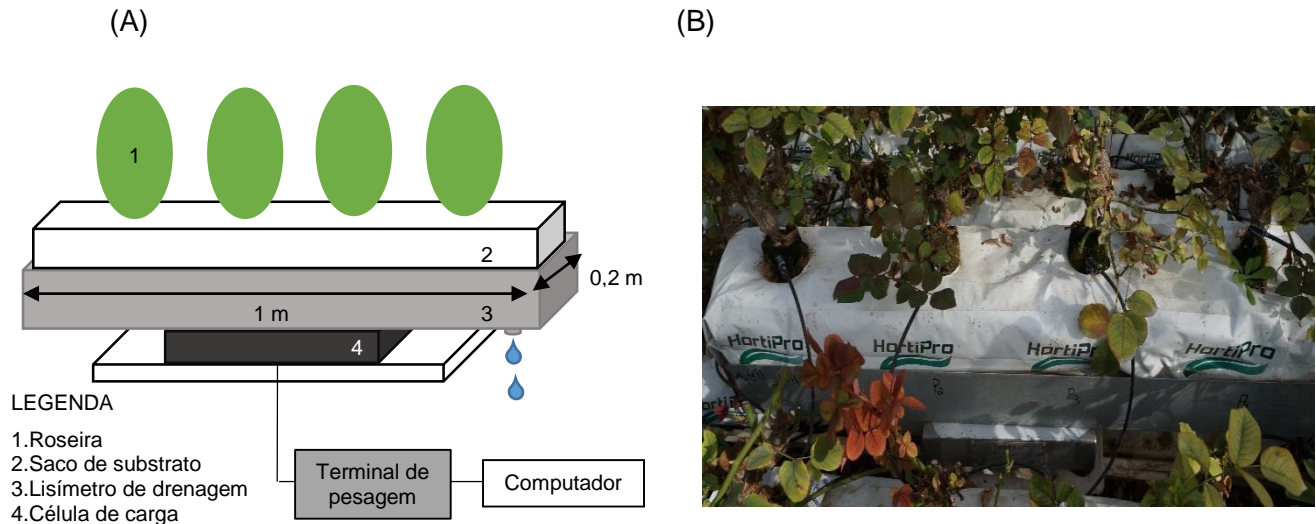


Figura 6. Esquema de um lisímetro de carga (A) e imagem de um lisímetro de carga (estrutura metálica do lisímetro e a plataforma monocélula que a suporta) (B).

Os lisímetros de carga consistiram na instalação de uma plataforma monocélula, com capacidade de 30 Kg e resolução de 2 gramas, sob a estrutura dos lisímetros de drenagem (Figura 3). Estes lisímetros foram ligados a um sistema automático de aquisição de dados (computador e software de recolha de pesagens), sendo os dados armazenados a cada minuto. Este sistema foi especificamente desenvolvido para este efeito. Neste contexto foi necessário recorrer a sistema de pesagens específicos, nomeadamente: i) plataforma em aço inox equipada com uma célula eletrónica com proteção contra humidades. Inclui quatro pés de regulação em altura de ajuste rápido e fácil. Nivelamento da plataforma efetuado através de bolha de nível incorporada na mesma, ii) células eletrónicas analógicas de flexão Modelo MC-BL, preparadas para ambientes industriais extremamente agressivos. iii) célula de carga com classe de precisão de 6000 divisões para desempenhos de alta performance e CREEP 0 para permitir o funcionamento em contínuo, iv) terminal de pesagem equipado com tecnologia LED's, com visualização de pesagem até seis dígitos e porta de comunicação RS-232 para comunicação com sistemas de automação e v) aquisição de dados (Figura7): periodicidade (desde cinco segundos), dados exportados (data, hora e massa) e modelo de exportação para formato excel. Atendendo à distância entre balanças em cada um dos sectores utilizaram-se dois computadores fixos (um para o sector A e B e outro para o sector C e D) para fazerem o registo e acumulação de dados. A colheita dos dados acumulados nos computadores dos sectores foi realizada através de um computador portátil.

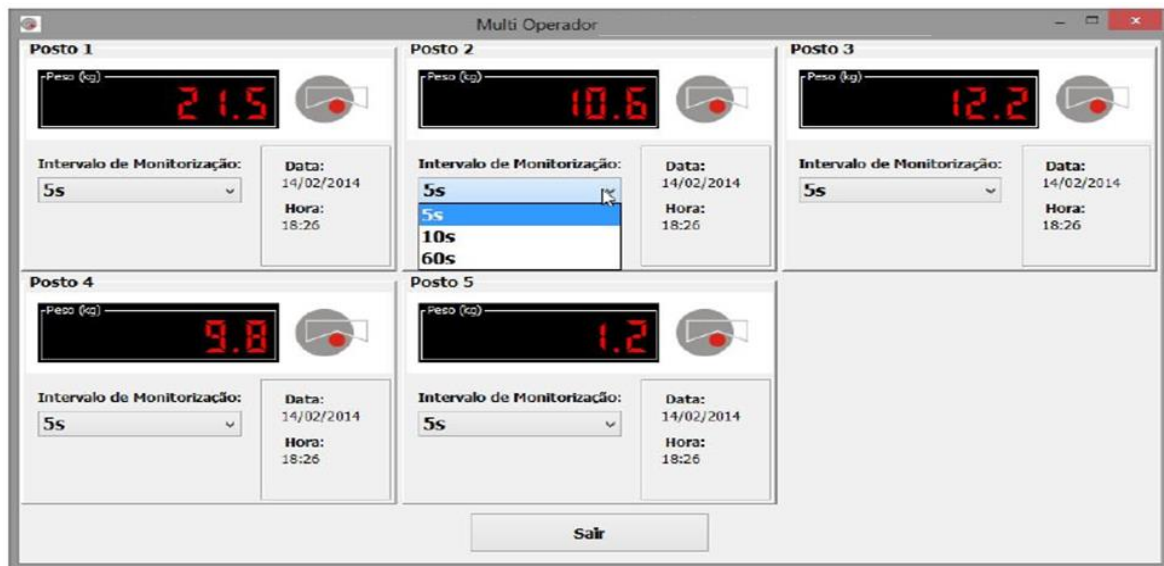


Figura 7. Layout do programa concebido para a aquisição de dados de 5 balanças em simultâneo. Exemplo com intervalos de monitorização de 5 s.

Como foi referido anteriormente, para a obtenção da ET_c diária recorreu-se aos registos dos lisímetros de carga. Assumiu-se que a variação de massa na balança durante um dado período em que não ocorreu rega nem drenagem correspondeu à variação da ET_c . Neste estudo assumiu-se ainda que a densidade da solução drenada é igual à densidade da água (cerca de 1 Kg m^{-3}), pelo que 1 g correspondeu a 1 ml.

A ET_c foi assim calculada pela diferença na massa (Kg) obtida após a cessação da drenagem de uma rega e o início da rega seguinte. O momento de cessação da drenagem foi determinado graficamente. O valor obtido foi depois dividido pela área do lisímetro ($0,2 \text{ m}^2$). De seguida foi feita a conversão para a unidade convencional para a ET de mm dia^{-1} .

Na determinação da ET_c assumiu-se que a ET correspondeu à transpiração supondo-se que as perdas de água por evaporação eram negligenciáveis devido ao acondicionamento do substrato pelo plástico.

Paralelamente à determinação da ET_c procurou-se ainda avaliar o rigor e a precisão dos registos dos lisímetros de carga para determinar, de modo indireto, as dotações das regas e respetivas drenagens. Com este propósito procedeu-se a uma experiência em que se comparou os valores das dotações e drenagens observadas, com os respetivos valores indiretos determinados através da variação de massa registada nas balanças. Nesta experiência considerou-se que a dotação indireta de cada rega correspondia à diferença entre a massa (Figura 8) observada no momento M2 (massa registada após o final da rega) e a massa observada no momento M1 (massa registada imediatamente antes de iniciar a rega). As drenagens correspondem às diferenças de

massa observadas entre o momento M3 e M2 (Figura 8). O momento M3 correspondeu ao ponto em que as variações de massa da balança estabilizaram, indicando o final da drenagem livre da solução nutritiva.

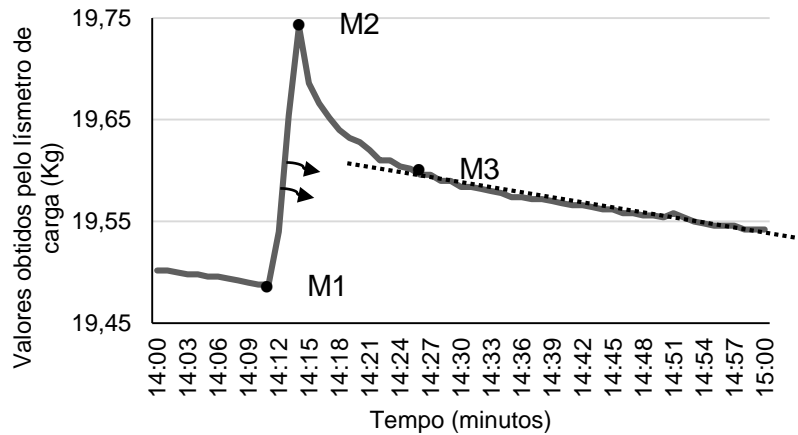


Figura 8. Registo obtido pelo lisímetro de carga da variação de massa na unidade de amostragem devido à rega e drenagem, com o ponto de início da rega (M1), do final da rega (M2) e do final da drenagem livre (M3).

O rigor das medições indiretas das dotações de rega e drenagens foram avaliadas através de dois tipos de testes. No primeiro as regas foram efetuadas com o dreno do lisímetro aberto, sendo as drenagens efetuadas à medida que as regas ocorriam “drenagens simultâneas”. Nesta abordagem, a massa no momento 2 (M2) foi afetada pelo volume de água que entretanto foi drenando simultaneamente com a entrada de água de rega (setas da figura 5).

Para contornar esta insuficiência das determinações com “drenagens simultâneas” procedeu-se ao registo das dotações e drenagens das regas com o dreno do lisímetro tapado. Neste caso, o volume de drenagem foi medido cerca de 30 minutos após o término da drenagem. Através deste procedimento a massa no momento M2 não foi afetada pelas perdas das drenagens o que supostamente irá possibilitar a determinação das dotações indiretas da rega com maior rigor.

A comparação dos resultados obtidos para as dotações e drenagens foi efetuada em 31 regas, na primeira situação (“drenagens simultâneas”), e 32 regas quando o dreno do lisímetro de carga foi tapado. O rigor dos resultados das dotações e drenagens obtidas por ambos os métodos foram comparadas através dos seguintes testes estatísticos:

- Teste *t student* para amostras emparelhadas e médias das diferenças absolutas e relativas, para as dotações e drenagens;
- Regressão linear com passagem na origem, para as drenagens estimadas e observadas.

6. Modelação dos parâmetros biofísicos e programação da rega

Procedeu-se ao desenvolvimento de regressões múltiplas para modelação da: i) evapotranspiração cultural (ET_c) através de parâmetros biofísicos, ii) área foliar através de medições alométricas e iii) programação rega através do sensor de radiação em função de parâmetros biofísicos. Nesta secção apresentamos os procedimentos efetuados para a estimação e validação destes modelos de regressão de regressão múltipla recorrendo ao programa SPSS versão 20.

As variáveis a introduzir em cada um dos modelos foram seleccionadas recorrendo à técnica de regressão passo-a-passo (*stepwise-regression*) que permite para cada etapa do cálculo, avaliar o grau de significância de cada uma das variáveis exógenas na variável dependente (Montgomery and Peck, 1992). As observações utilizadas na construção do modelo correspondem à informação recolhida sobre cada uma das unidades de amostragem.

Para cada modelo desenvolvido testou-se os pressupostos de normalidade, da homocedasticidade e a ausência de multicolinearidade entre as variáveis independentes. Sempre que se mostrou apropriado procedeu-se à transformação das variáveis para garantir os pressupostos referidos.

O diagnóstico das observações extremas ou “outliers” processou-se através do teste dos valores estandarizados das distâncias DfFit. Os do DfFit permitem observar a diferença esperada no valor do ajuste do modelo pela exclusão de uma observação em particular. Valores estandarizados das distâncias DfFit que excedem o dobro do valor obtido da raiz quadrada do quociente entre o número de variáveis independentes e o número de observações indicam a existência de uma observação multivariada extrema.

No caso dos valores do sensor de radiação foi necessário proceder à prévia transformação dos dados para retirar a tendência (*detrend*) inerente à duração do período de recolha de dados (julho a setembro).

Para cada modelo procedeu-se à análise de variância para testar a sua significância estatística. A significância estatística dos parâmetros dos modelos foi avaliada recorrendo ao teste *t_Student*.

A análise à qualidade de ajustamento dos modelos obtidos foi feita com o recurso ao valor do coeficiente de determinação (R^2) e a estimativa do erro padrão da amostra de regressão (SE). Procedeu se ainda à avaliação do rigor e precisão do modelo através de comparações entre os valores observados e estimados pelo modelo: i) o desvio médio absoluto (MAD), ii) o desvio médio

relativo (RAD), iii) a raiz quadrada do erro quadrado médio (RMSE) e iv) qualidade de ajustamento da reta de regressão com passagem pela origem.

De modo a detetar a existência de colinearidade entre as variáveis do modelo recorreu-se ao valor do fator de inflação da variância (VIF) e da tolerância (T).

$$VIF = \frac{1}{1 - r^2}$$

$$T = \frac{1}{VIF}$$

Em que o r , é o coeficiente de correlação.

As variáveis foram excluídas do modelo sempre que o valor de VIF foi superior a 10 ou T inferior a 0,1, tal como descrito em Montgomery and Peck (1992).

A avaliação dos pressupostos do modelo de regressão e sua validação permitem verificar a sua adequação como ferramenta de previsão quando se utilizam novas observações das variáveis independentes. O modelo de regressão pode apresentar um bom ajuste aos dados da amostra mas poderá não o ter quando transposto para fora do intervalo de confiança sobre o qual foi estimado.

Para a validação dos modelos foram utilizados dois tipos de procedimentos que diferem na qualidade da amostra: validação externa e validação cruzada (Montgomery and Peck, 1992).

Na validação externa utilizou-se cerca de 10-20% das observações (dependo dos modelos) não utilizadas na estimação e avaliou-se a qualidade do modelo para estas observações (“observações independentes”) através do desvio médio absoluto (MAD), desvio médio relativo (RAD) e raiz quadrada do erro quadrado médio (RMSE). A qualidade da validação do modelo é tanto maior quanto mais próximos forem os valores de MAD, RAD e RMSE da série de estimação e da serie de validação.

Na validação cruzada utilizou-se o procedimento “menos um elemento” (*leave one out*) de validação cruzada (Gommes et al., 1981) para validar externamente o modelo de programação de rega através do sensor de radiação. Este procedimento consistiu na remoção de uma observação dependente da série temporal de estimação e a determinação de um novo modelo de regressão com as observações correspondentes às restantes observações, calculando-se o erro que se cometeu na previsão do valor da observação que foi retirada. Este processo repetiu-se sequencialmente até que todas as observações dependentes tenham sido utilizadas para previsão. Estes valores indicam

a diferença esperada no valor previsto pelo modelo quando uma observação em particular foi considerada em comparação quando foi excluída. Por conseguinte, calculando o RAD, RMSE e reta de regressão com passagem pela origem entre os dados observados e os previstos pelo modelo foi possível obter uma medida quantitativa da capacidade preditiva do modelo estimado.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Uniformidade do sistema de rega

Conforme referido a uniformidade do sistema de rega foi avaliado no período de inverno e no período de verão. Da pré avaliação da uniformidade de distribuição (UD) do sistema de rega verificou-se ser necessário proceder ao ajustamento da duração de rega dos sectores A e D (dados não apresentados). Após este ajustamento os sectores A e D ficaram com uma duração de rega de 150 e 125 segundos, respetivamente. Os sectores C e B mantiveram a duração de rega de 135 segundos. Após esta pré-avaliação procedeu-se à avaliação final da UD do sistema.

A avaliação da UD do sistema de rega nos 4 sectores em estudo foi efetuada em duas datas distintas, apresentando-se os resultados obtidos na Tabela 5 e na Figura 6.

De acordo com os resultados verifica-se que o valor de UD dos sectores foi sempre superior a 93%, apresentando valores médios de 96% no conjunto dos sectores em ambas as fases de teste (Tabela 5). Estes resultados permitiram-nos classificar a UD dos sectores em excelente de acordo com os valores propostos pelo NSW Department of Primary Industries (2009a) (Tabela 3).

Tabela 5. Uniformidade da distribuição dos sectores A, B, C e D e sua classificação no período de inverno e de verão.

Sectores	10/02/2014		27/06/2014	
	UD (%)	Classificação	UD (%)	Classificação
A	94,20	Excelente	93,80	Excelente
B	96,86	Excelente	97,11	Excelente
C	96,10	Excelente	96,31	Excelente
D	95,19	Excelente	97,43	Excelente

Da análise do coeficiente de variação (CV) dos diferentes sectores, (Figura 9), verifica-se que este apresenta, entre os dois momentos de avaliação da uniformidade do sistema de rega um valor máximo de 5%. O reduzido CV dos sectores permite garantir uma elevada homogeneidade nos débitos dos gotejadores dentro de cada sector em estudo.

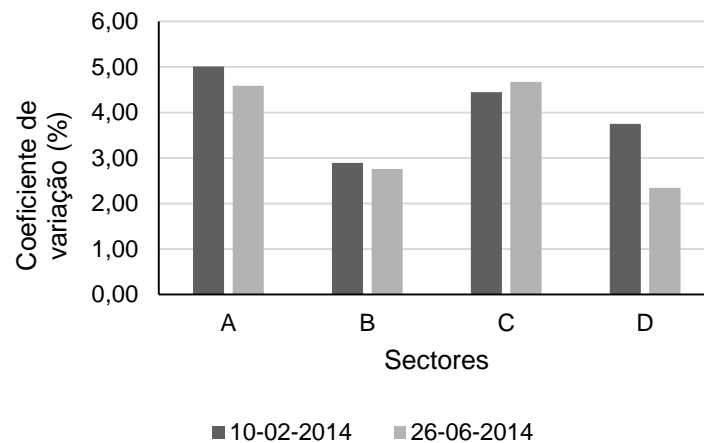


Figura 9. Comparação dos coeficientes de variação dos sectores de rega A, B, C e D.

Este bom desempenho do sistema de rega no que respeita à UD da água de rega é determinante para garantir a aplicação da mesma quantidade de água e nutrientes a todas as plantas, evitando assim condições de excesso e/ou défice de água em partes da estufa. Estes resultados têm impacto sobre a produção obtida, quer no que respeita à sua qualidade quer à sua quantidade, uma vez que a disponibilidade de água e nutrientes têm influencia direta no crescimento das plantas (Raviv and Lieth, 2008).

2. Modelos de estimativa da área foliar com base em descritores alométricos

Conforme referido na secção 4.1 dos Materiais e Métodos, foi implementado e testado um modelo matemático baseado em medidas alométricas para estimativa da área foliar (AF) com vista à obtenção de informação para integração no modelo de estimativa da ET. Os resultados obtidos para a cultivar 'Red Naomi' são apresentados nas duas secções seguintes.

2.1. Estimativa da área da folha

De modo a testar a adequabilidade do método baseado em imagens digitais das folhas para estimar a AF, foi feita a comparação dos resultados obtidos por este método e pelo medidor de área foliar (AM350; ADC BioScientific). A Figura 10 apresenta a comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos, verificando-se uma forte correlação entre os dois conjuntos de dados ($R^2 = 0,95$; $n=36$).

$p < 0,000$). As diferenças na determinação da AF entre estes dois métodos foram sempre inferiores a 18% sendo o desvio médio de 5,7 %. Os resultados desta comparação devem ainda ser ponderados considerando que as medições efetuadas com o medidor de área foliar exigem a destruição da planta, enquanto que as medições resultantes da metodologia SAAF foram obtidas no local sem destruição da folhagem em avaliação. Estes resultados permitem constatar que a determinação da AF através do processamento de imagens digitais permite uma estimativa precisa e rigorosa para a medição da AF em rosas que por parâmetros operacionais e de custos constitui uma alternativa ao uso dos medidores portáteis de AF. Como tal, a AF obtida por esta metodologia foi considerada para a comparação dos resultados obtidos com o modelo de estimação da AF.

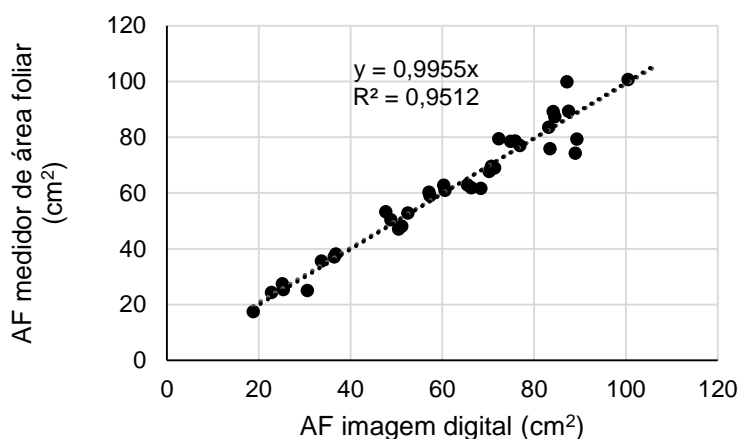


Figura 10. Comparação da área foliar (AF) obtida através do método destrutivo (Medidor de AF, AM350; ADC BioScientific) e método não destrutivo (Imagem digital tratada em Photoshop).

Do conjunto de parâmetros alométricos medidos para a estimativa da AF (Tabela 4), quatro foram selecionados para a modelação tendo por base o método *stepwise regression*: comprimento da folha (CF); largura da folha (LF); número de folíolos (NF) e posição numérica relativa da folha na haste (PRFn).

Na amostra utilizada para a construção do modelo estimador da área da folha, os valores de CF observados variaram entre 4,7-18,9 cm, LF entre 3,8-12,2 cm, NF de 3 a 7 e a PRFn de 6,7 a 100 %, sendo o CV observado para estes parâmetros igual a 21%, 22%, 25% e 52% respetivamente. A AF medida da amostra considerada variou entre 7,5-111,8 cm², com um CV de 42%, indicando estes valores a variabilidade da amostra considerada na implementação e posterior teste do modelo de estimativa da AF. Estes dados encontram-se dentro do intervalo de valores obtidos pelos autores Gao et al. (2012) para a área foliar de roseiras. No modelo definido, o CF e o LF foram usados de forma combinada, como $\ln(CF \cdot LF)$. A variável dependente (AF) foi transformada em $\ln AF$, através

da função logaritmo, garantindo desta forma a linearização do modelo e a homogeneidade da variância dos seus resíduos.

A Tabela 6 apresenta a estimativa dos parâmetros do modelo e respetivos testes de diagnóstico de ajustamento. O modelo selecionado explicou 92% da variabilidade da área foliar ($R^2 = 0,92$; $n = 176$; $p < 0,000$) para diferentes estados de desenvolvimento das folhas. Os valores do fator de inflação da variância (VIF) são muito inferiores a 10 e os de tolerância (T) superiores a 0,1, o que indica inexistência de colinearidade entre as variáveis selecionadas.

Tabela 6. Estatísticas dos parâmetros, teste de ajustamento e de diagnóstico e validação do modelo de estimativa da área foliar.

Variáveis selecionadas ^a	Parâmetros		Testes de ajustamento e diagnósticos (n=176)						Validação do modelo (n=24)	
	$\beta \pm SE$	t^b	$R^2 (p)$	SE	T	VIF	MAD	RMSE	MAD	RMSE
			0,92 ($p < 0,000$)	0,14			0,11	0,14	0,10	0,13
Constante	-1,283 \pm 0,112									
PRFn	0,002 \pm 0,000	0,000			0,697	1,435				
ln (CF*LF)	0,964 \pm 0,026	0,000			0,809	1,237				
NF	0,069 \pm 0,009	0,000			0,717	1,395				

a) Variáveis selecionadas com recurso ao método *stepwise regression* ($p < 0,05$) e ao seu valor de T e VIF. As seguintes variáveis não foram consideradas estatisticamente significativas, pelo método *stepwiseregression*: CF, LF, PFn, $\sqrt{(CF*LF)}$, $CF*LF$, $1/CF$, \sqrt{CF} , CF^2 , PFa, DE, PRFa. PPRFn (Posição numérica relativa da folha na haste), CF (Comprimento da folha), LF (Largura da folha) e NF (Número de folíolos).

b) Probabilidade associada ao teste *t* Student.

O produto entre o comprimento e a largura da folha revelou-se uma importante variável do modelo. Este resultado está de acordo com modelos de previsão da AF desenvolvidos para a roseira (Gao et al., 2012) assim como para outras culturas, como a videira (Montero et al., 2000) ou o pimento (De Swart et al., 2004). Segundo De Swart et al (2004) a forma da folha também depende da sua posição na haste, pelo que a inclusão da posição individual da folha pode levar a estimativas da AF mais rigorosas. Este facto foi comprovado pela seleção da variável PPRFn para o modelo de previsão da AF.

A Figura 11 mostra a relação entre os valores de AF observados e os valores estimados pelo modelo. O declive da reta de identidade é próximo de 1 sendo o coeficiente de determinação de 0,92 ($n=176$) o que nos permite afirmar que o modelo apresenta elevada precisão e rigor na determinação da AF (Fig. 11A). O RAD entre a AF observada e a modelada foi de 3% e em apenas em 16% dos casos os desvios foram superiores a 20% (Fig. 11B).

Da aplicação do modelo definido a uma série com dados independentes provenientes de 24 folhas, obtiveram-se valores do MAD e do RSME iguais a 0,13 e 0,10, respetivamente (Tabela 6).

Estes valores são semelhantes aos obtidos para os testes de ajustamento e diagnóstico (Tabela 6), logo dando uma indicação da robustez e capacidade preditiva do modelo.

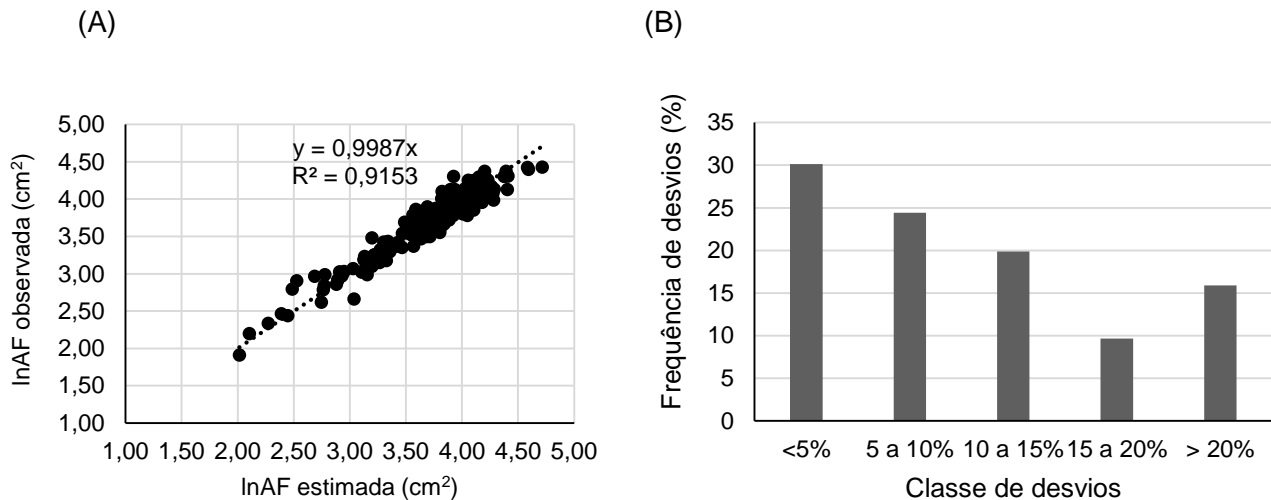


Figura 11. Comparação entre os valores observados e os valores estimados de área foliar (AF) através de: (A) regressão linear com reta de identidade e (B) frequência de classes de desvios.

2.2. Estimativa da área foliar da haste

Do conjunto de parâmetros alométricos medidos para a estimativa da AF da haste, três foram selecionados para a modelação tendo por base o método *stepwise regression*: altura da haste (AH); estado do botão floral (EB) e número de folhas da haste (NFH).

Na amostra utilizada para a construção do modelo estimador da AF da haste os valores da variável dependente variaram entre 198,4 e 794,7 cm², apresentando esta um CV de 42,4%. No caso das variáveis independentes os valores de AH variaram entre 11,4 e 68,5 cm e NFH de 4 a 15, sendo que os CV da AH e NFH foram de 52% e 28%, respetivamente. Relativamente ao EB, a amostra apresentou registos de dois níveis de desagregação, ou seja, classe 0 (haste sem botão floral) e classe 1 (haste com botão floral).

De acordo com a Tabela 7 o modelo selecionado explicou 95% ($R^2 = 0,95$; $n = 26$; $p < 0,000$) da variabilidade da área foliar das hastes. Os valores do VIF foram inferiores a 10 e o valor de T superior 0,1 pelo que se pode concluir que não existe colinearidade entre as variáveis selecionadas pelo modelo.

A seleção da variável EB com dois níveis de desagregação (classe 0: haste sem botão floral e classe 1: haste com botão floral) pelo modelo permite concluir que, além das variáveis muito diretamente relacionadas com a haste (altura e número de folhas da haste), também o estado

fenológico tem influência sobre AF das hastes. Tal poderá estar relacionado com a distribuição de fotoassimilados entre a parte vegetativa e floral. Em hastes sem botão haverá uma maior acumulação de fotoassimilados na parte vegetativa da planta do que em hastes com botão, influenciando o desenvolvimento da haste.

Tabela 7. Estatísticas dos parâmetros, teste de ajustamento e de diagnóstico e validação do modelo de estimativa da área foliar da haste.

Variáveis selecionadas ^a	Parâmetros		Testes de ajustamento e diagnósticos (N=26)						Validação do modelo (N=3)	
	$\beta \pm SE$	t ^b	R ² (p)	SE	T	VIF	MAD	RMSE	MAD	RMSE
Constante	30,162±34,501		0,95 (p<000)	44,25			31,71	40,20	41,33	50,72
AH	10,007±0,999	0,000			0,190	5,264				
EB	158,885±32,227	0,000			0,321	3,120				
NFH	11,590± 5,385	0,043			0,428	2,336				

a) Variáveis selecionadas com recurso ao método *stepwise* (p<0.05) e ao seu valor de T e VIF. As seguintes variáveis não foram consideradas estatisticamente significativas, pelo método *stepwise*: EB1 e EB2. AH (Altura da haste), EB (Estado do botão floral), NFH (Número de folhas da haste)

b) Probabilidade associada ao teste *t* Student.

A Figura 12 indica a relação entre os valores de AF observados e os valores estimados pelo modelo. Observando o declive da reta de identidade verifica-se que este é próximo de 1 sendo o coeficiente de determinação de 0,94, o que permite afirmar que o modelo apresenta elevada precisão e rigor na determinação da AF da haste (Fig. 12A).

O RAD entre a AF observada e a modelada foi inferior a 8,2 % e em cerca de 90% dos casos observados as diferenças de AF foram inferiores a 15% (Fig. 12B). O de R² (0,95) obtido para o modelo é próximo do valor obtido por Suay et al. (2003) (R²=0,85;n= 67) para a estimativa da AF de hastes com botão de roseiras.

O modelo desenvolvido quando comparado com outros modelos de estimativa da área foliar apresenta como vantagens: i) a sua utilização ao longo do desenvolvimento da cultura, já que a maioria dos modelos é desenvolvida numa fase específica da cultura, nomeadamente a colheita e ii) a obtenção da área foliar da planta de modo mais expedito, o que poderá potenciar a sua aplicação num contexto de produção.

Os valores do MAD e do RSME para a série de validação, resultante de uma série com dados independentes (n=3), foram um pouco mais elevados do que os obtidos para a estimativa do modelo (Tabela 7), mas representando um RAD aceitável (igual a 16%).

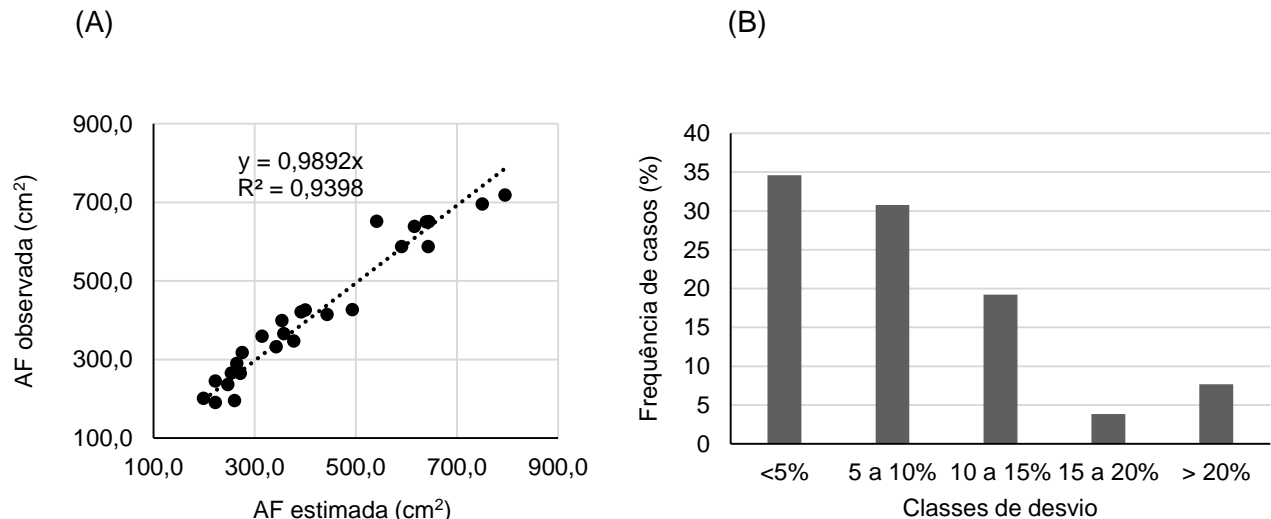


Figura 12. Comparação entre os valores observados e os valores estimados da área foliar (AF) da haste através de: (A) regressão linear com reta de identidade e (B) frequência de classes de desvios.

3. Avaliação do desempenho dos lisímetros de carga na determinação das dotações e respetivas drenagens

Os valores de dotações das regas e drenagens obtidos de forma indireta através dos lisímetros de carga foram comparados com os valores observados para avaliar o desempenho deste sistema nas condições de estudo (Secção 5 de Material e Métodos).

As pequenas variações entre observações quer nas dotações observadas (CV = 3,9%) quer nas registadas com os lisímetros de carga (CV= 8,2%) (Tabela 8), devem ser considerados de grande rigor sobretudo porque se tratam de medições de volumes muito pequenos.

Da avaliação das dotações e respetivas drenagens, com o dreno do lisímetro aberto, verifica-se que o desvio médio relativo (RAD) das dotações de rega observadas e registadas com o lisímetro de carga foi de 13%, enquanto para o caso das drenagens foi de 14% (Tabela 8).

As dotações de rega determinadas pelos dois métodos apresentam um RAD inferior aos das drenagens. Todavia, as médias das dotações determinadas através das balanças são estatisticamente inferiores ($p < 0,000$) às médias das dotações obtidas pelas observações. No que respeita aos valores de drenagem observados e estimados verifica-se que o MAD foi de cerca de 12 ml, a que correspondeu um RAD de cerca de 14% (Tabela 8). As médias dos dois conjuntos de drenagens, quando comparadas, não diferiram estatisticamente. Ao comparar os valores observados contra os do lisímetro de carga, através de regressão com passagem na origem, verifica-se que o R^2 é elevado (0,90; $n=31$; $p < 0,000$) e o valor do declive da reta próximo de um (0,97), o que permite

afirmar que a determinação das drenagens através do registo do lisímetro de carga, é um método rigoroso e preciso.

Tabela 8. Estatísticas de comparação entre as dotações e drenagens observadas e determinadas através do registo do lisímetro de carga com o dreno aberto.

Estatísticas	Unidades	Dotações		Drenagens	
		Observados	Lisímetro de carga	Observados	Lisímetro de carga
Nº de observações		31	31	31	31
Média	ml	265,13	232.75	107,10	105,4
CV	%	3,93	8,22	41,66	41,60
Sig test_t*	[]	0,0000		0,1557	
MAD	ml	33,90		11,61	
RAD	%	12,77		13,53	
Regressão 1:1					
Declive		- - -		0,97	
R²		- - -		0,90	

*probabilidade associada ao teste t emparelhadas.

Da análise dos valores obtidos para as dotações e drenagens observadas e estimadas pelo lisímetro com o dreno fechado (Tabela 9), verificou-se que para o caso das dotações ocorreu uma diminuição do MAD para 14 ml e do RAD para 6%. O que nos indica um melhor desempenho do sistema utilizando o dreno fechado. Contudo as médias das dotações determinadas através do registo do lisímetro de carga, tal como no teste anterior realizado com as drenagens simultâneas, são estatisticamente inferiores ($p<0,000$) às médias das dotações obtidas pelas observações.

As dotações obtidas através do lisímetro com o dreno fechado, quando comparadas com o valor das dotações observadas são sistematicamente inferiores (média de 14 ml; Tabela 9) (Figura 13).

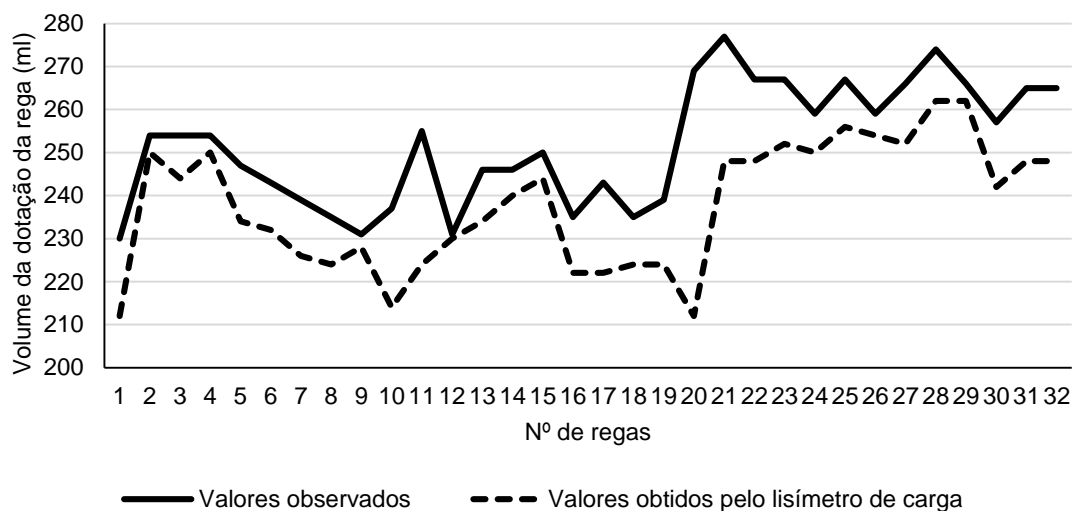


Figura 13. Comparação dos volumes da dotação da rega observados e obtidos pelo lisímetro de carga.

Esta falta de precisão entre as duas medições pode dever-se ao modo como foram medidos os caudais no lisímetro de carga e no gotejador de referência.

Como referido na secção material e métodos, a contabilização dos volumes de entrada de água nas 12 unidades de amostragem foi feita de um modo indireto através do recurso a um “gotejador de referência” posicionado num saco de substrato contíguo a cada unidade de amostragem. A determinação do volume emitido pelo gotejador de referência foi efetuada recolhendo o volume emitido para um recipiente e medindo-o com o recurso a uma proveta graduada.

De acordo com este procedimento a solução hídrica do gotejador de referência drena para uma superfície livre, enquanto que os gotejadores dos lisímetros drenam para o substrato. Neste ultimo caso, o volume a escoar vai estar submetido a uma maior resistência por parte do substrato o que origina, para a mesma pressão no gotejador, um menor débito. Assim para a mesma pressão de funcionamento os gotejadores de referência, quando comparados com os gotejadores da balança apresentam maior débito relativo, porque drenam para uma superfície livre. Por sua vez o gotejadores dos lisímetros para as mesmas condições de pressão do gotejador de referência apresentam uma maior resistência ao seu escoamento por parte do substrato, o que origina menores débitos.

A diferença no débito de gotejadores originada pela pressão do meio de drenagem é abordada num estudo de Gil et al. (2008)

Neste contexto, considerou-se o desvio médio de 14 ml, entre as dotações observadas e as obtidas pelo lisímetro de carga, um erro instrumental. Após a soma deste valor às dotações determinadas pelo lisímetro, verificou-se que as médias dos dois conjuntos de dotações, quando comparadas, não diferiram estatisticamente de acordo com o teste *t_Student* pareado ($p=0,4867$).

Quanto aos valores de drenagem observados e estimados verificou-se que o MAD foi de cerca de 9 ml, a que correspondeu um desvio médio relativo de cerca de 12%, sendo estes valores próximos dos obtidos para a situação do lisímetro com o dreno aberto (Tabela 8).

Quando comparadas as médias destes dois conjuntos verificou-se que estas não diferiram estatisticamente. Ao comparar os valores observados contra os estimados, através de regressão com passagem na origem, verifica-se que o coeficiente de determinação se mantém igual a 0,90 (Tabela 8).

Tabela 9. Estatísticas de comparação entre as dotações e drenagens observadas e determinadas através do registo do lisímetro de carga com o dreno fechado.

Estatísticas	Unidades	Dotações		Drenagens	
		Observados	Lisímetro de carga	Observados	Lisímetro de carga
Nº de observações		32	32	32	32
Média	ml	251,94	237,88	86,03	85,59
CV	%	5,52	6,16	43,60	40,86
Sig test_t*	[]	0,0000		0,4127	
MAD	ml	14,06		8,56	
RAD	%	5,53		11,72	
Regressão 1:1					
Declive		- - -		0,98	
R²		- - -		0,90	

*probabilidade associada ao teste t emparelhadas.

As diferenças entre valores observados e obtidos através dos lisímetros de carga são de cerca de 5% para as dotações e de 12% para as drenagens o que representam uma diferença sempre inferior a cerca de 14ml (Tabela 9).

De acordo com os resultados obtidos conclui-se que os lisímetros apresentados apresentam precisão e rigor adequados para estimar as dotações e as drenagens neste sistema de cultura.

Estes resultados devem ainda ser relativizados porque são comparados com um valor considerado de referência e que tem na sua determinação erros próprios de medição sobretudo se considerarmos os pequenos volumes de dotações e drenagem em análise.

Uma solução futura que permita fazer a leitura automática da variação de massa nos lisímetros de carga poderá permitir automatizar o sistema. Para além da precisão obtida, relativamente às medições manuais das drenagens, o sistema permitirá fazer uma monitorização frequente da drenagem sem o inerente custo acrescido de mão-de-obra e tempo dispensado e com o acréscimo do rigor na gestão da água e da nutrição vegetal.

No que respeita à utilização de sensores de carga enquanto método de programação da rega, constata-se que estes apresentam diversas potencialidades. Para além de permitirem a medição rigorosa da ETc e a automatização da rega, estes sensores, conforme demonstrado, apresentam ainda potencialidade de determinar de forma expedita as dotações e as drenagens. No entanto para a plena utilização deste sistema é necessário conhecer qual o nível de água no substrato para o qual se deve iniciar a rega, sem que haja risco de estresse para as plantas. Esta fração de depleção é ainda pouco conhecida em culturas em substrato, dependendo esta de diversos fatores (e.g. tipo de substrato, tipo de cultura) pelo que serão necessários mais estudos para a sua plena utilização.

Conforme referido anteriormente nesta metodologia tem de ter em conta o crescimento da planta, o que inclui não apenas a parte aérea da mesma mas também a parte radicular, que ao crescer ocupará espaço anteriormente preenchido por água.

No entanto considerando dois momentos próximos em que se conhece a massa de água no substrato (e.g., logo após a drenagem), pode considerar que a variação de massa registada pelo sistema corresponde à variação da ETc nesse período.

Uma vez conhecida a fração de depleção a utilizar num dado momento de cultura é possível determinar, com base na evolução da ETc determinada pelo sensor de carga, quando se atingiu a fração de depleção preconizada e, conseqüentemente, proceder à rega com uma dotação que permita garantir o nível de drenagem objetivo.

A grande vantagem deste método prende-se com a não necessidade de ajustamento às condições locais, nomeadamente ao sistema de cultura.

A principal insuficiência desta metodologia prende-se com o carácter pontual das suas determinações e que poderá ser resolvido com a colocação de um número adequado de sensores de carga na área de cultivo.

4. Modelação da programação rega através do sensor de radiação em função de parâmetros climáticos e culturais

De modo a estimar o valor de radiação acumulada necessário para se atingir um valor de drenagem previamente definido para a cultura em estudo desenvolveu-se um modelo matemático baseado em parâmetros biofísicos.

A gestão da rega através do sensor de radiação decorreu em dois períodos distintos, nomeadamente entre os meses de fevereiro e abril e julho e setembro de 2014. Durante estes dois períodos procedeu-se ao ajustamento dos níveis de radiação acumulada de modo a atingir o valor de drenagem previamente definido de 40%, considerando-se como valor aceitável quando a drenagem se encontrava entre os 35 e 45%.

O procedimento partiu de um valor base de radiação que foi sendo ajustado em função dos resultados de drenagem dos sectores. Contudo os valores seleccionados e baseados na bibliografia (Kittas et al., 2005; 470 KJ m⁻²/ 132 Wh m⁻²; Fascella et al., 2010; 500 KJ m⁻²/ 140 Wh m⁻²) resultaram num intervalo de rega muito curto (entre 40 a 60 minutos), tendo como consequência um número excessivo de regas quando comparado com o número de regas efetuado pelo produtor. Este desajustamento pode ter-se devido ao facto das condições ambientais da região serem diferentes

daquelas em que foram obtidos os valores de referência (e.g. maior radiação no exterior da estufa, nebulosidade). Por outro lado, os valores de referência apresentados na bibliografia não referem o estado de desenvolvimento da planta nem as condições meteorológicas do interior da estufa. Por este motivo, foi necessário proceder à calibração do sensor considerando valores diferentes da bibliografia e também a consideração de outros parâmetros biofísicos para além da radiação.

A figura 14 apresenta os valores observados de drenagem dos sectores A, B, C e D nos dias em que se verificou a drenagem resultante da radiação acumulada e nos dias em que se seleccionou o nível de radiação acumulado para atingir um valor de drenagem de 40% sem considerar qualquer outro parâmetro biofísico da cultura ou ambiente da estufa.

O objetivo do valor de drenagem como referido foi de 40%, considerando contudo como aceitáveis os valores entre os 35 e 45%. De acordo com a figura 14 verifica-se que, conforme o sector, entre 54 a 73% dos casos os valores drenagem não coincidem com os valores de drenagem entre 35 a 45%.

Nos dias de céu limpo e temperaturas elevadas os valores de drenagem estiveram por vezes acima do valor objetivo (35 a 45%), enquanto que nos dias com bastante nebulosidade os valores eram inferiores a este valor objetivo. Em dias de forte nebulosidade, verificaram valores extremamente baixos de drenagem (<20%) resultado de um reduzido número de regas, sendo este valor inferior ao mínimo de regas defendido por Hoog (2001), pelo que teve de se proceder a regas suplementares.

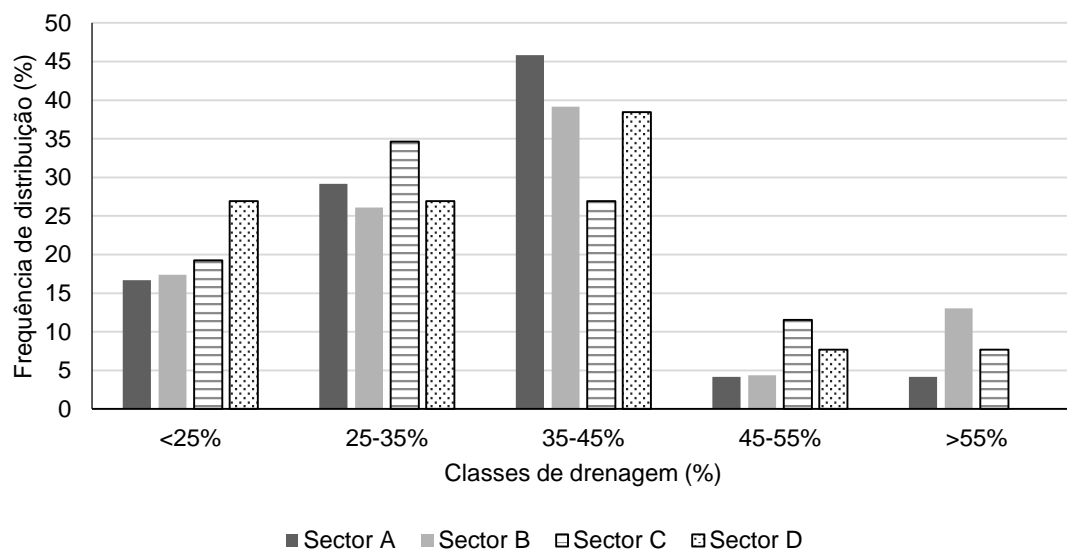


Figura 14. Relação entre os valores de radiação acumulada e drenagem observada em cada sector, durante o período de julho e setembro (n=99).

A figura 14 não contabilizou os resultados de drenagem obtidos nos dias nublados (três dias) em que o produtor optou por regas manuais complementares. Os resultados da figura 14 permitem verificar que os valores radiação per si não são suficientes para atingir rigorosamente os valores de drenagem pretendidos. Para os 99 valores de ajuste de radiação testados, verifica-se que 63% dos não permitem obter valores de drenagem no intervalo entre 35 a 45%.

O facto da frequência de valores observados de drenagem inferiores ao intervalo 35 a 45% ser bastante superior aos valores superiores a este intervalo pode dever-se ao facto de se ter verificado alguma nebulosidade, nem sempre prevista, durante o período de recolha de dados, principalmente durante o período da manhã.

Partindo deste estrangulamento, procedeu-se a construção de um modelo de regressão multivariável entre os dados de radiação acumulada (variável dependente) para iniciar uma rega e uma série de variáveis independentes como a drenagem, as condições meteorológicas e observações da canópia.

$$RADa = \beta_0 + \beta_1 * DREN + \beta_2 * AFH + \beta_3 * FP + \beta_4 * SECT... + \beta_n * METEO + \varepsilon, \text{ onde}$$

RADa é o valor de radiação ($Wh\ m^{-2}$) acumulada para ocorrer uma rega, β_0 , β_1 , β_2 e β_n são coeficientes das variáveis independentes do modelo: drenagem (DREN, %); área foliar das hastes (AFH, cm^2); número de folhas do “pulmão” (FP), SECT é a classe correspondente ao sector da estufa (classe 1: sector A; classe 2: sector B; classe 3: sector C e classe 4: sector D) e METEO são as diferentes variáveis meteorológicas registadas no interior da estufa (temperatura média diária, temperatura máxima diária e humidade média diária). O erro ou resíduo que não é explicado pelas variáveis independentes é representado por ε .

A construção deste modelo foi feita apenas com dados referentes ao período de julho a setembro, uma vez que não se dispõe da informação sobre a área foliar e o “pulmão” das plantas para o primeiro de fevereiro e março.

Os registos dos valores das variáveis independentes DREN, AFH e FP foram determinados em cada uma das 12 unidades de amostragem dos sectores. As estatísticas descritivas referentes a cada uma das variáveis do modelo por sector e período de observação podem ser consultadas na tabela 10.

Modelação da evapotranspiração da roseira em cultivo em substrato

Tabela 10. Estatísticas descritivas das variáveis consideradas para construir o modelo para estimação da radiação acumulada.

Variável biofísica*	Sector	julho (década)				agosto (década)				setembro (década)				Média	CV (%)
		2ª		3ª		1ª		2ª		3ª		2ª			
		Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)		
RADa (Wh m ⁻²)	A	850,0	0,0	1050,0	0,0	1107,1	4,8	1050,0	5,2	1040,6	9,0	912,5	1,5	1001,7	9,8
	B	900,0	0,0	1100,0	0,0	1133,3	2,2	1040,0	5,3	1095,0	3,8	975,0	0,0	1040,6	8,5
	C	-	-	1050,0	0,0	1068,8	2,4	1012,5	6,8	862,5	5,5	725,0	8,0	943,8	15,5
	D	-	-	945,0	4,3	1000,0	3,8	985,0	12,5	790,9	11,5	637,5	2,1	871,7	17,8
	Média	875,0	0,0	1036,3	1,1	1077,3	3,3	1021,9	7,5	947,3	7,5	812,5	2,9	964,4	10,6
	CV	4,0		6,3		5,4		2,9		15,2		19,4			
DREN (%)	A	59,3	10,3	27,2	60,4	49,0	12,6	29,3	40,5	37,0	19,9	39,8	20,5	40,3	30,2
	B	63,7	2,4	31,2	43,2	45,7	38,2	27,6	81,0	44,0	17,4	35,3	44,8	41,3	31,7
	C	-	-	39,7	13,9	32,8	19,4	20,2	68,8	35,8	29,6	24,8	12,1	30,7	26,1
	D	-	-	40,0	44,7	28,8	65,2	6,6	184,2	31,5	32,4	36,8	34,9	28,7	45,7
	Média	61,5	6,4	34,5	40,6	39,1	33,9	20,9	93,6	37,1	24,8	34,2	28,1	37,9	34,9
	CV	5,1		18,4		25,0		49,4		14,0		19,1			
Td (°C)	A	19,3	0,0	21,2	3,1	21,6	5,6	19,3	1,1	20,8	11,4	23,3	0,7	20,9	7,2
	B	19,3	0,0	21,2	3,1	21,7	5,6	19,3	1,1	21,5	14,3	23,1	0,0	21,0	7,0
	C	-	-	22,8	0,0	22,9	4,5	20,5	0,3	21,5	11,1	24,9	1,6	22,5	7,4
	D	-	-	22,4	2,7	23,0	4,8	20,5	0,3	21,7	11,1	24,9	1,5	22,5	7,3
	Média	19,3	0,0	21,9	2,2	22,3	5,1	19,9	0,7	21,4	12,0	24,1	1,0	21,5	8,0
	CV	0,0		3,8		3,4		3,5		1,8		4,1			
Tdmax (°C)	A	28,0	0,0	28,7	4,2	29,3	2,3	25,9	1,3	28,3	5,2	30,6	4,5	28,5	5,5
	B	28,0	0,0	28,7	4,2	29,4	2,5	26,0	1,3	27,7	11,6	29,3	0,0	28,2	4,5
	C	-	-	31,8	0,0	31,6	3,2	29,3	4,5	31,0	6,8	36,2	3,4	32,0	8,0
	D	-	-	31,0	3,5	31,7	3,4	29,1	4,5	31,1	6,9	36,2	3,2	31,8	8,3
	Média	28,0	0,0	30,1	3,0	30,5	2,9	27,6	2,9	29,5	7,6	33,1	2,8	30,1	6,6
	CV	0,0		5,3		4,4		6,8		6,0		11,0			
Hd (%)	A	85,5	0,0	85,6	3,8	89,6	7,9	88,8	0,9	85,3	0,6	89,2	1,7	87,3	2,4
	B	85,5	0,0	85,6	3,8	85,6	0,6	88,6	0,9	88,2	4,4	90,6	0,0	87,4	2,4
	C	-	-	83,2	0,0	85,0	0,9	87,8	1,3	84,3	4,6	83,9	2,8	84,8	2,1
	D	-	-	89,9	10,2	85,1	0,9	88,0	1,3	83,7	4,3	83,9	2,7	86,1	3,2
	Média	85,5	0,0	86,1	4,5	86,3	2,6	88,3	1,1	85,4	3,5	86,9	1,8	86,4	1,2
	CV	0,0		3,2		2,5		0,5		2,3		4,0			
AFH (cm ²)	A	3451,3	17,6	2912,7	34,3	1496,9	46,9	2523,0	2,8	2760,4	20,1	1201,3	33,9	2390,9	36,3
	B	3206,0	6,4	2423,7	36,7	2359,7	22,9	2453,2	84,2	1722,2	54,0	2198,7	53,6	2393,9	20,1
	C	-	-	1907,0	36,0	1949,0	42,8	2045,3	19,1	1714,1	22,0	1702,5	38,3	1863,6	8,1
	D	-	-	2026,8	54,9	1017,0	4,6	3763,8	3,1	3773,0	14,3	1739,8	45,9	2464,1	50,6
	Média	3328,7	12,0	2317,6	40,5	1705,7	29,3	2696,3	27,3	2492,4	27,6	1710,6	42,9	2278,1	27,2
	CV	5,2		19,6		33,9		27,5		39,5		23,8			
FP	A	120,0	51,0	119,3	46,7	115,7	57,0	132,3	55,1	128,5	57,9	131,3	56,6	124,5	5,7
	B	100,7	45,1	99,3	39,3	99,3	38,1	104,4	30,4	101,2	47,3	102,3	45,1	101,2	1,9
	C	-	-	83,0	13,7	86,6	10,2	134,0	41,8	134,2	39,9	130,3	37,9	113,6	23,2
	D	-	-	107,6	33,1	105,0	29,9	155,8	18,6	149,9	17,3	143,0	22,8	132,3	18,3
	Média	110,4	48,1	102,3	33,2	101,7	33,8	131,6	36,5	128,5	40,6	126,7	40,6	117,9	11,6
	CV	12,4		14,9		11,9		16,0		15,8		13,6			

* RADa (Radiação acumulada); DREN (Drenagem diária da unidade de amostragem); Td (Temperatura média diária); Tdmax (Temperatura diária máxima); Hd (Humidade relativa média diária); AFH (Área foliar das hastes da unidade de amostragem) e FP (Folhas do "pulmão" da unidade de amostragem). A variável Hd não foi seleccionada como variável no modelo.

Os resultados da tabela 10 permitem verificar a grande amplitude de variação quer das variáveis independentes quer da variável dependente o que permite testar o modelo num conjunto de situações muito diversas necessária para a sua ampla aplicação.

Na tabela 10 verifica-se que longo do período experimental verifica-se que as variáveis DREN e AFH apresentam valores de CV elevados, (26,1-45,7%) e (8,1-50,6%) respetivamente, quando comparadas com as restantes variáveis, o que permite inferir acerca da heterogeneidade dos dados. As variáveis mais homogêneas ao longo do período de recolha de dados foram a Td e a Tdmax, apresentando estas os valores de CV menos elevados, (7-8%) e (4,5-8,3%) respetivamente.

Entre sectores verifica-se que os sectores A e B apresentam, de um modo geral, valores de CV relativamente próximos entre si quando comparados com os sectores C e D.

Os dados referentes ao sensor de radiação referem-se ao período de meados de julho a meados de setembro, e com um horário de regas entre as 07:00 e as 18:00. A Figura 15 mostra a tendência dos níveis de radiação acumulada durante este período.

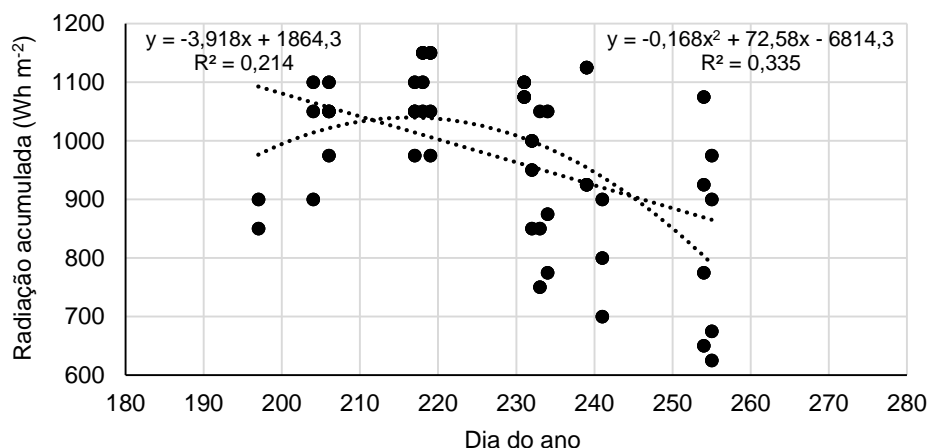


Figura 15. Tendência linear e quadrática da variação da radiação acumulada no período de julho a setembro (n=149).

Neste estudo cerca de 33% da variabilidade da radiação é explicada pelo período do ano em que foi observada (Figura 15). Verifica-se, portanto, uma tendência nos dados (*trend*) de radiação acumulada que não pode ser explicada pelos dados de drenagem ou outras variáveis biofísicas. Neste contexto, foi retirada a tendência (*detrend*) dos dados de radiação antes de se submeter a análise de regressão.

A retirada da tendência da série temporal dos dados de RADa foi efetuada assumindo uma tendência quadrática. A variável dependente do modelo será constituída pelos valores de radiação acumulada após retirada da tendência da serie temporal. Para tal, subtraiu-se aos valores de cada observação de RADa os valores estimados pela regressão quadrática apresentada na figura 15.

$$RADa_{dtrended} = RADa_{obs} - trend \quad \text{em que}$$

$RADa_{dtrended}$ é a radiação acumulada corrigida da sua tendência temporal, $RADa_{obs}$ é a radiação acumulada observada no sensor e $trend$ é a tendência temporal representada pelo ajuste quadrático da evolução temporal da radiação representada na figura 15.

O diagnóstico das observações extremas ou “outliers” através do teste dos valores estandarizados das distâncias DfFit (dados não apresentados) permitiu identificar 3 observações anómalas (dados das três unidades de amostragem do sector B no dia 11/09/14) e que foram retiradas do processo de estimação do modelo.

A tabela 11 apresenta a estrutura e testes de ajustamento e diagnóstico do modelo de regressão que determina o valor da radiação acumulada a selecionar de modo a se atingir um determinado valor de drenagem de um sector da estufa em função das condições biofísicas prevaletentes das plantas e da estufa.

Tabela 11. Estatísticas dos parâmetros, teste de ajustamento e de diagnóstico do modelo de estimativa da radiação acumulada a selecionar para atingir um dado valor de drenagem.

Variáveis selecionadas ^a	Parâmetros		Testes de ajustamento e diagnósticos (n=136)						
	$\beta \pm SE$	t^b	$R^2 (p)$	SE	T	VIF	MAD	RAD	RMSE
			0,78 ($p<000$)	51,70			41,25	4,37	50,35
Constante	200,508±63,826								
SECT	-35,353±5,298	0,000			0,535	1,869			
Td	61,872±4,893	0,000			0,212	4,713			
Tdmax	-45,014±4,011	0,000			0,169	5,928			
AFH	-0,015±0,005	0,002			0,825	1,212			
DREN	-1,201±0,341	0,001			0,699	1,431			
FP	-0,251±0,098	0,011			0,874	1,144			

a) Variáveis selecionadas com recurso ao método *stepwise* ($p<0.05$) e ao valor de T e VIF das variáveis. SECT (Classe correspondente ao sector da estufa (classe 1: sector A; classe 2: sector B; classe 3: sector C e classe 4: sector D)) Td (Temperatura média diária); Tdmax (Temperatura diária máxima); Hd (Humidade relativa média diária); AFH (Área foliar das hastes da unidade de amostragem) e FP (Folhas do “pulmão” da unidade de amostragem).
b) Probabilidade associada ao teste *t* Student.

De acordo com a tabela 11 o modelo selecionado, baseado nas variáveis SECT, Td, Tdmax, AFH, DREN, FP explicou 78% ($R^2 = 0,78$; $n = 136$, $p < 0,000$) da variabilidade da radiação acumulada. Os valores do VIF são inferiores a 10 e o valor de T superior 0,1 pelo que se concluiu que não existe colinearidade entre as variáveis selecionadas pelo modelo. O reduzido valor do RAD (4,37) e os valores próximos do MAD (41,25) e do RMSE (50,35) são indicativos de um bom ajustamento entre os valores de radiação acumulada observados e estimados.

De acordo com os resultados da tabela 11, a radiação acumulada a selecionar para um dado nível de drenagem pretendido, depende da diferença entre a temperatura média diária (Tdm) e a temperatura máxima diária (Tdmax), cujo valor está muito dependente das condições de nebulosidade. Assim, para um dado nível de drenagem pretendido, a radiação acumulada será tanto menor quanto maior a diferença entre a Tdm e a Tdmax, sendo esta diferença superior em dias sem nebulosidade, conforme se poderá constatar adiante nas figuras 18 C e D. Neste contexto, a presença destas duas variáveis no modelo permite, de forma indireta, inferir sobre as condições de nebulosidade diárias, que como se sabe tem uma grande influência nas necessidades hídricas das culturas, conforme se poderá constatar adiante nas figuras 18 A e B.

A figura 16 permite visualizar o comportamento do modelo em diferentes situações de valores de radiação acumulada.

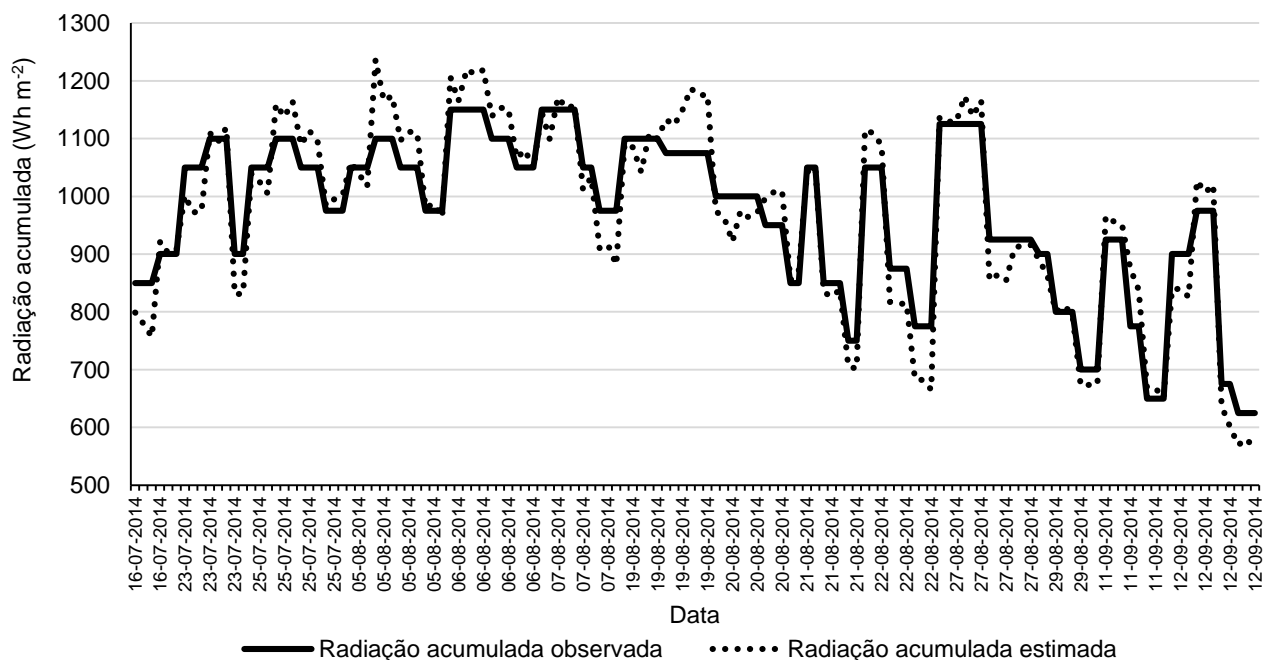


Figura 16. Comparação entre os valores de radiação observados e estimados pelo modelo.

A tabela 12 permite consultar os resultados da validação do modelo quer na validação externa quer na validação cruzada.

Tabela 12. Estatísticas de diagnóstico da validação externa e cruzada do modelo de estimativa da radiação acumulada.

Diagnóstico da validação externa (n=10)			Diagnóstico da validação cruzada (n=136)		
MAD	RAD	RMSE	MAD	RAD	RMSE
38,49	4,58	46,01	43,52	4,62	53,38

Da aplicação do modelo definido a uma série com dados independentes provenientes de 10 observações e da validação cruzada obtiveram-se, obtiveram-se valores do MAD e do RSME semelhantes (Tabela 12). Estes valores são semelhantes aos valores de MAD (41,25), RAD (4,37) e RMSE (50,35) obtido para os testes de ajustamento e diagnóstico do modelo (Tabela 11), o que é indicativo da robustez do modelo.

A figura 17 permite verificar a comparação entre os valores observados e estimados pelo modelo quer na serie de estimação quer no processo de validação cruzada.

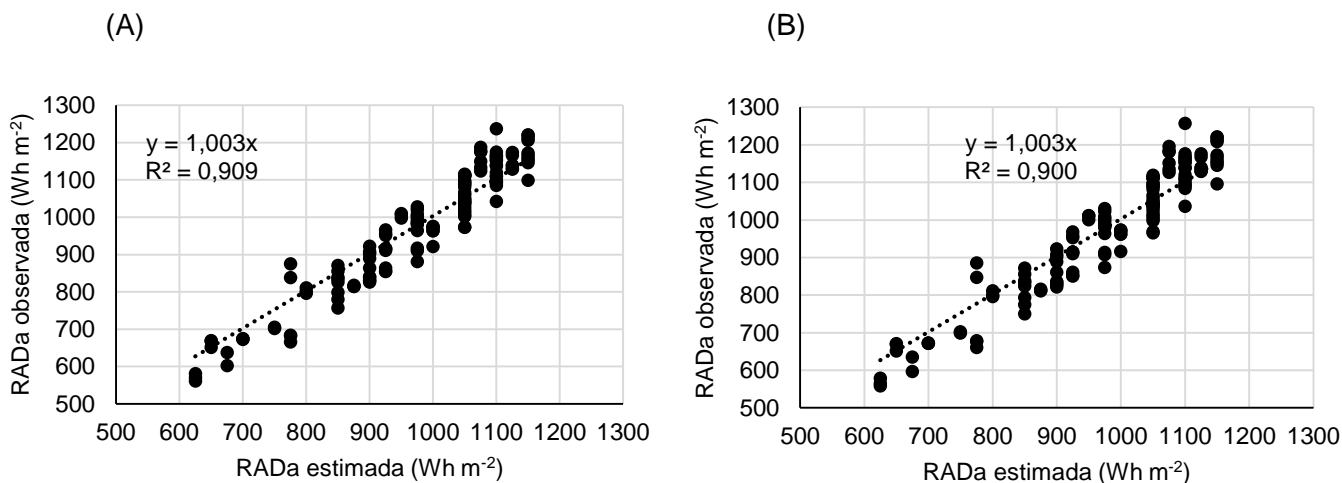


Figura 17. Retas de regressão entre valores observados e estimados da radiação acumulada (RADa) da série de estimação (A) e da série de validação cruzada (B). Coeficiente de determinação (R^2) e declive da reta.

A Figura 17 indica a relação entre os valores de radiação acumulada observados e os valores estimados pelo modelo. Observando os declives das retas de identidade verifica-se que estes são próximos de 1 sendo o coeficiente de determinação de 90%. Este facto permite concluir que o modelo apresenta elevada precisão e rigor.

Em termos de aplicabilidade o modelo recorre a variáveis que podem ser facilmente obtidas como o sector, a temperatura da estufa ou a drenagem. No que respeita aos parâmetros culturais estes tornam o modelo menos expedito, dado o dispêndio de tempo e mão-de-obra necessário à sua obtenção. No entanto a sua substituição por parâmetros de mais fácil obtenção (e.g. altura média das plantas) poderá contribuir para uma maior operacionalidade do modelo.

Este modelo foi selecionado com dados referentes aos período de julho a setembro, apenas a realização de testes em outras épocas do ano e com diferentes horários de rega permitirão avaliar a portabilidade deste modelo para a programação de rega em outros períodos do ano e em diferentes horários.

5. Evapotranspiração da roseira e coeficiente cultural ao longo do período experimental

Com a informação obtida a partir dos lisímetros de carga foi possível calcular a ET_c diária para um conjunto de dias ao longo do período experimental. Os lisímetros de carga apresentaram alguns dias com registos anómalos que tiveram de ser excluídos. Por este motivo não foi possível obter series temporais contínuas para longos períodos.

Na figura 18 A e B é apresentada a comparação entre a ET_c registada para um dia de céu encoberto (27/08/2014) e para um dia de sol (19/08/2014) e num dos sectores da estufa (sector C). É também apresentada a evolução da temperatura e da humidade relativa para estes mesmos dias (Figura 14 C e D). O estado fenológico e a área foliar das plantas deste sector é semelhante nos dois dias.

Ao observar as figuras 18 A e B verifica-se que no dia de sol a ET_c diária da unidade de amostragem do sector C foi claramente superior à da ET_c diária do dia nublado, 4,79 e 2,71 mm d⁻¹, respetivamente. Este resultado dever-se-á à forte influência da radiação na ET (Suay et al, 2003; Viana et al. 2001, citada em Oliveira et al., 2014). Também Mpusia (2006) verificou uma queda acentuada da ET_c em condições de estufa num dia de céu encoberto por comparação a dias de céu limpo. Verifica-se também que no dia de céu encoberto as variações da ET_c no período de maior calor (12-17h; Figura 18A) não foram tão pronunciadas como no caso do dia de céu limpo (Figura 18B). Este facto poderá estar relacionado com a resposta das plantas ao fecho dos estomas nas condições de temperaturas mais elevadas observadas no dia de céu limpo (Figura 18D).

Da análise da figura 18 verifica-se também que o padrão da ET_c pode ser explicado em função da temperatura do ar e da humidade relativa do interior da estufa. Os valores mais elevados de ET foram registados no mesmo período em que se observaram os valores mais baixos de

humidade relativa, quer no caso do dia de céu nublado quer no dia de céu limpo. Em ambos os dias os valores mais elevados de ET_c foram também registados nos períodos em que a temperatura foi mais elevada. No entanto, este padrão não é tão evidenciado de forma tão clara no dia de céu encoberto. O padrão de ET_c diária observado é semelhante ao apresentado por Mpusia (2006) para uma cultura de rosas em estufa e por Pardossi et al. (2011) para uma cultura de gerbera em estufa em diferentes períodos do ano.

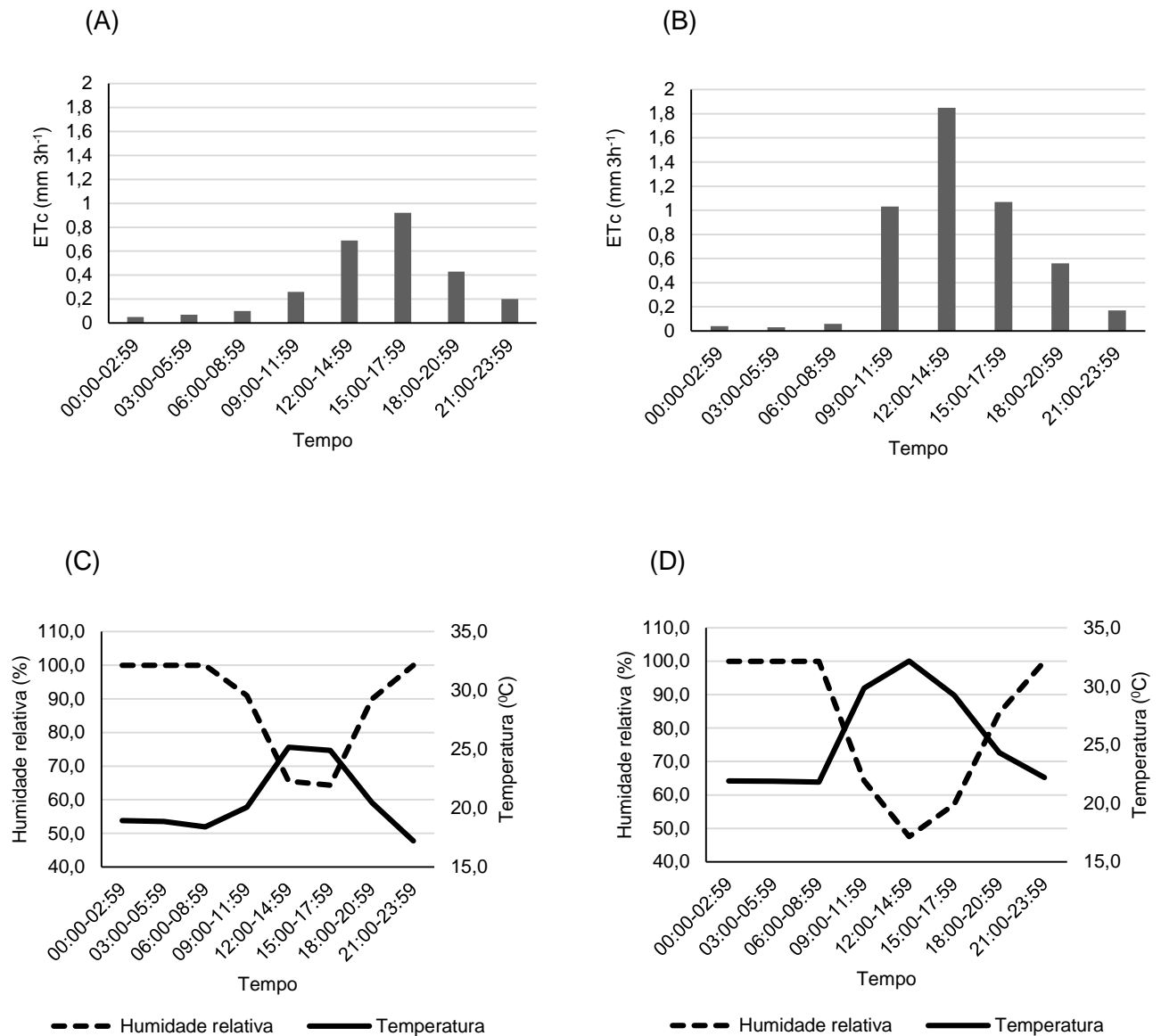


Figura 18. Evolução diária da evapotranspiração cultural (ET_c), da temperatura e humidade relativa no interior da estufa ao longo de um dia nublado (A e C) e de um dia com sol (B e D) de uma unidade de amostragem do sector C.

Na figura 19 (A e B) são apresentados os valores de ET_c e coeficientes culturais ($K_c = ET_c / ET_0$) obtidos nos sectores B, C e D para diversos dias ao longo do período em que foram feitos os registos com o lisímetro de carga.

A ETo diária foi obtida conforme Allen, et al. (1998), através do programa REF-ET (REF-ET version 3.1). Não se encontram representados os resultados para o sector A devido a uma falha de registo do lisímetro de carga.

Da análise das figuras é possível constatar que os valores de ETc (e Kc) são consistentemente mais baixos no sector B para as datas apresentadas. Os sectores C e D apresentam valores mais próximos entre si. Os valores mais baixos observados para o sector B estão associados com as variações das condições climáticas dentro da estufa: temperaturas mais baixas e humidade relativa mais alta na parte na parte sul da estufa, onde se posiciona o sector B, comparativamente aos valores observados na parte norte da estufa, onde se encontram os sectores C e D (Figura 2). A temperatura e a humidade relativa são consideradas para o cálculo do défice de pressão de vapor (DPV) resultando em valores mais elevados para esta parâmetro nos sectores C e D comparativamente ao sector B em todas as datas consideradas (Tabela 13). Por outro lado, os valores de DPV foram consistentemente mais baixos para a primeira data (19/08/2014) em todos os sectores, do que nas outras duas datas (Tabela 13). Deste modo, o DPV segue o mesmo padrão observado pela ETc (Figura 19A), tal como observado por Mpusia (2006), realçando a importância deste parâmetro sobre a procura evapotranspirativa.

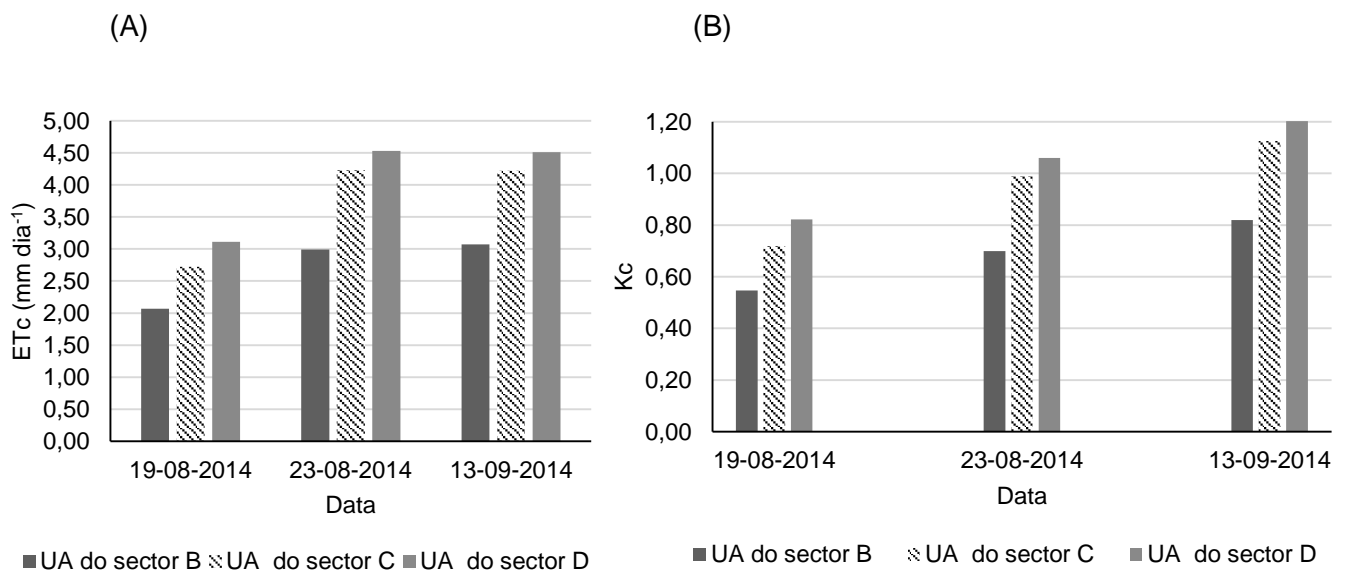


Figura 19. Evolução da (A) evapotranspiração cultural (ETc) e do (B) coeficiente cultural (Kc) de uma unidade de amostragem do sector B, C e D nos dias 19 e 20 de agosto e 13 de setembro de 2014.

Os valores de Kc observados para o sector B foram mais baixos nas três datas (Figura 19B) como consequência dos valores de ETc consistentemente mais baixos obtidos neste sector (Figura 19A) ($Kc = ETc/ETo$). Para os sectores C e D, o intervalo de valores de Kc registado nas três datas amostradas variou entre 0,72 e 1,20, correspondendo a um valor médio de 0,99. Este valor médio é

mais baixo do que o obtido por Oliveira et al. (2014; $K_c = 1,18$) e Arevalo et al. (2013; $K_c = 1,13$) para uma cultura de rosas em estufa durante a fase produtiva. No entanto, é de realçar que, nas condições de estudo, as rosas se encontram em fase produtiva, durante a qual vão sendo efetuados periodicamente cortes, pelo que ocorrem variações frequentes na área foliar e consequentemente no K_c . Por outro lado, os valores correspondem apenas a três dias, logo não cobrem toda a fase produtiva.

Tabela 13. Valores de déficit de pressão de vapor (DPV) das unidades de amostragem (UA) B, C e D nos dias 19 e 20 de agosto e 13 de setembro de 2014.

Parâmetros	19-08-2014			23-08-2014			13-09-2014		
	UA do sector B	UA do sector C	UA do sector D	UA do sector B	UA do sector C	UA do sector D	UA do sector B	UA do sector C	UA do sector D
DPV	0,54	0,72	0,72	0,77	1,01	1,01	0,80	1,32	1,32

6. Modelo de estimativa da evapotranspiração da roseira em função de parâmetros climáticos e culturais

De modo a estimar a ET_c diária (ET_{Cd}) da roseira produzida em substrato foi desenvolvido um modelo matemático de estimação. O modelo de ET_{Cd} foi baseado em variáveis culturais e climáticas (Tabela 14), sendo que o primeiro conjunto incluiu a área foliar das hastes e o número de folhas do “pulmão” e o segundo a temperatura do ar ($^{\circ}C$), a humidade relativa (%), e o déficit de pressão de vapor. Devido ao comportamento não linear de algumas variáveis foi necessário proceder a sua transformação recorrendo para isso à raiz quadrada, logaritmo natural e quadrado. O conjunto de variáveis utilizadas no desenvolvimento do modelo estimador da ET_c foram selecionadas com base na análise prévia dos dados obtidos no estudo e em informação na literatura (Bacci et al., 2011; Mpusia, 2006; Suay et al., 2003).

As variáveis climáticas consideradas são relativas a períodos distintos do dia, nomeadamente: a variável T1 que diz respeito à temperatura média as 00:00h e as 06:00h; as variáveis T2 e H2 que são relativas à temperatura e humidade relativa média entre as 06:00h e a primeira rega do dia; as variáveis T10 e H10 que correspondem à temperatura e humidade relativa média entre o final da drenagem da última rega e as 21:00h; a variável T11 que diz respeito à temperatura média entre as 21:00h e 00:00h; e as variáveis Td e Hd que dizem respeito à temperatura e humidade relativa média do dia.

Para a construção do modelo estimador da ET_{Cd} foi usado um número inicial de 46 observações, sendo que 20% ($n=9$) destas foram utilizados para a validação do modelo. Durante a

análise de estimação do modelo foram considerados *outliers* as observações que apresentavam desvio relativos muito elevados, em resultado de valores de ETc anormalmente baixos ($< 0,6 \text{ mm dia}^{-1}$); estes valores de ETc muito baixos conduziram a que pequenos desvios absolutos originassem desvios relativos muito elevados. Também foram considerados *outliers* as observações em que se registou desvios relativos muito elevados devido a valores médios de Hd anormalmente baixos para o período de recolha de registos. No seguimento desta abordagem o conjunto de dados de estimação do modelo reduziu-se de 37 para 33 registos de ETc observada.

Do conjunto de parâmetros medidos para a estimativa da ETCd da cultura, três foram selecionados para a modelação tendo por base o método *stepwise regression*: o logaritmo da humidade relativa média do dia (Ln_Hd); a raiz quadrada da área foliar das hastes (Raiz_AFH); o número de folhas do pulmão (FP). A seleção destas variáveis realça a importância da AF, tal como referido por outros autores (e.g. Msupia, 2006; Pivetta, 2007; Suay et al., 2003). Adicionalmente, conforme discutido na secção 5 dos Resultados e Discussão, também a humidade relativa é um parâmetro determinante para na procura evapotranspirativa, tal como referido por Mpusia (2006).

Na amostra utilizada para a construção do modelo estimador da ETc diária os CV das variáveis selecionadas (tabela 14) foram de 47% para AFH, 42% para a FP e 6% para Hd. Deste modo, com a exceção para a variável Hd, o modelo foi desenvolvido com variáveis cuja variabilidade era elevada, o que contribuiu para a robustez do modelo. Também a variável dependente apresentou um valor elevado de CV (34%).

Tabela 14. Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na obtenção do modelo de estimação da evapotranspiração cultural diária (ETCd).

Variáveis	Símbolo* (unidades)	Média	CV (%)
Evapotranspiração cultural diária	ETCd (mm dia^{-1})	2,99	34,20
Área foliar das hastes	AFH (cm^2)	2227,55	46,92
Números de folhas do “pulmão”	FP	107,24	42,04
Humidade relativa média do dia	Hd (%)	86,06	5,66
Temperatura média entre as 00:00h e as 06:00h	T1 ($^{\circ}\text{C}$)	18,14	12,82
Temperatura média entre as 06:00h e a primeira rega	T2 ($^{\circ}\text{C}$)	20,74	9,67
Temperatura média entre o final da drenagem da última rega e as 21:00h	T10 ($^{\circ}\text{C}$)	22,48	8,77
Temperatura média entre as 21:00h e 00:00h	T11 ($^{\circ}\text{C}$)	18,84	11,61
Temperatura média do dia	T d ($^{\circ}\text{C}$)	21,69	8,75
Humidade relativa média entre as 06:00h e a primeira rega	H2 (%)	89,58	3,75
Humidade relativa média entre o final da drenagem da última rega e as 21:00h	H10 (%)	83,87	9,06
Défice de pressão de vapor diário	DPV (KPa)	0,89	32,67

*As variáveis T1, T2, T10, T11, Td, H2, H10 e DPV não foram selecionadas.

De acordo com a Tabela 15 o modelo selecionado, baseado nas variáveis Ln_Hd, Raiz_AFH e FP, explicou 90% ($R^2 = 0,90$; $n = 33$, $p < 0,000$) da variabilidade da ETc diária durante o período experimental. Os valores do VIF são inferiores a 10 e o valor de T superior 0,1 pelo que se pode concluir que não existe colinearidade entre as variáveis selecionadas pelo modelo.

Tabela 15. Estatísticas dos parâmetros, teste de ajustamento e de diagnóstico do modelo de estimativa da evapotranspiração cultural.

Variáveis selecionadas ^a	Parâmetros		Testes de ajustamento e diagnósticos						Validação do modelo	
	$\beta \pm SE$	t^b	$R^2 (p)$	SE	T	VIF	MAD	RMSE	MAD	RMSE
			0,90 ($p < 0,000$)	0,35			0,27	0,34	0,36	0,46
Constante	60,052 \pm 5,189									
Ln_Hd	-13,257 \pm 1,144	0,000			0,916	1,092				
Raiz_AFH	0,031 \pm 0,006	0,000			0,923	1,083				
FP	0,005 \pm 0,001	0,001			0,959	1,043				

a) Variáveis selecionadas com recurso ao método *stepwise regression* ($p < 0,05$) e ao valor de T e VIF das variáveis.

b) Probabilidade associada ao teste *t_Student*.

A Figura 19 indica a relação entre os valores de ETc diários observados e os valores estimados pelo modelo. Observando o declive da reta de identidade verifica-se que este é próximo de um sendo o coeficiente de determinação de 88%, o que permite afirmar que o modelo apresenta elevada precisão e rigor na determinação da ETc (Fig. 19A). Este valor de R^2 é próximo dos valores obtidos por Suay et al. (2003) para a estimativa da ETc em rosas em estufa através de um modelo de estimação. A diferença média relativa (RAD) entre a ETcd observada e a modelada foi inferior a 11% tendo em 88% dos casos os desvios sido inferiores a 20 % (Fig. 19B).

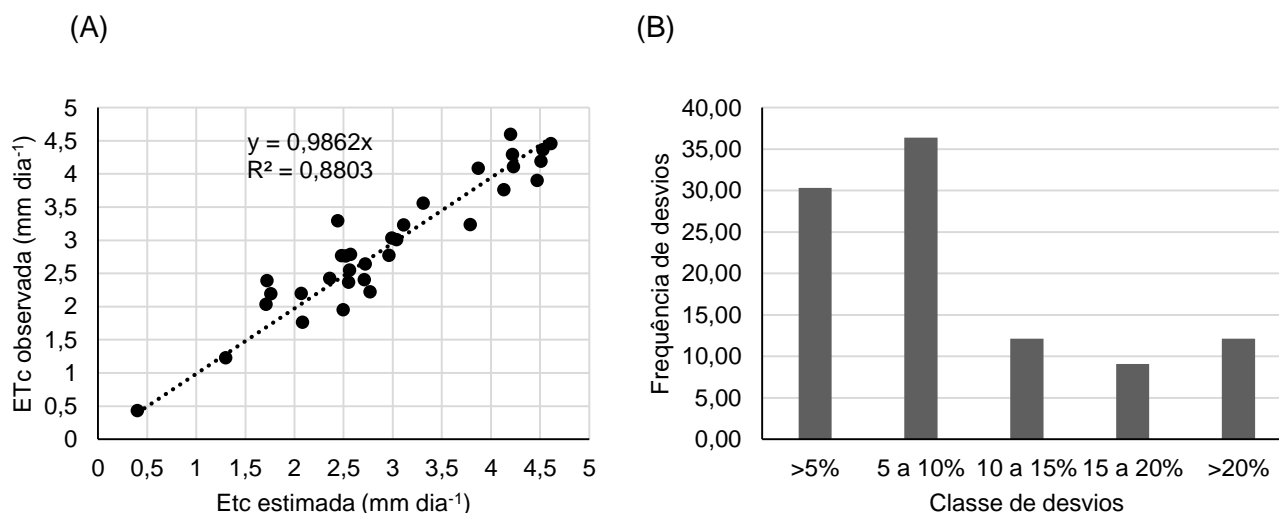


Figura 20. Comparação entre os valores observados e os valores estimados da evapotranspiração cultural (ETc) diária através de: (A) regressão linear com reta de identidade e (B) frequência de classes de desvios.

Uma série com dados independentes provenientes de 9 observações foi usada para validação do modelo. Os valores do MAD e do RSME observados foram de 0,36 e 0,46 respetivamente, sendo a diferença média relativa entre a ETCd observada e a modelada para a série de validação de 12%.

Quanto comparado com outros modelos utilizados para determinar a transpiração em roseiras (Bacci et al., 2011; Suay et al., 2003), o modelo desenvolvido apresenta como principal vantagem o facto de recorrer a um reduzido número de descritores, que podem ser facilmente obtidos sem necessidade de grande investimento em termos de custos. Para além dos primeiros necessitarem de um maior número de parâmetros ambientais, a sua portabilidade também se torna limitada já que existe a necessidade de ajustamento dos modelos para as condições locais. A metodologia desenvolvida não é apenas simples mas é também económica, constituindo uma alternativa no caso de não se poder recorrer a lisímetros de carga para a determinação da ETc.

Como constrangimento do modelo desenvolvido, à semelhança dos anteriormente referidos, destaca-se a utilização de variáveis que apenas poderão ser conhecidas no final do dia (e.g. humidade relativa). Todavia, o valor desta variável pode ser prevista com elevado rigor, por comparação com as condições atmosféricas do dia anterior, ou com base nas previsões convencionais da humidade exterior. Em qualquer dos casos, o valor de humidade introduzido para estimar a ETc poderá ser ajustado ao longo do dia, tendo como base os dados do sensor da estufa. A determinação das variáveis relativas à cultura (AFH e FP) constitui um outro fator que limita a operacionalidade do modelo, dado que é necessário um determinado investimento de tempo na sua determinação. Este constrangimento poderá ser ultrapassado através da eventual substituição das variáveis seleccionadas por um parâmetro que possa ser mais facilmente obtido.

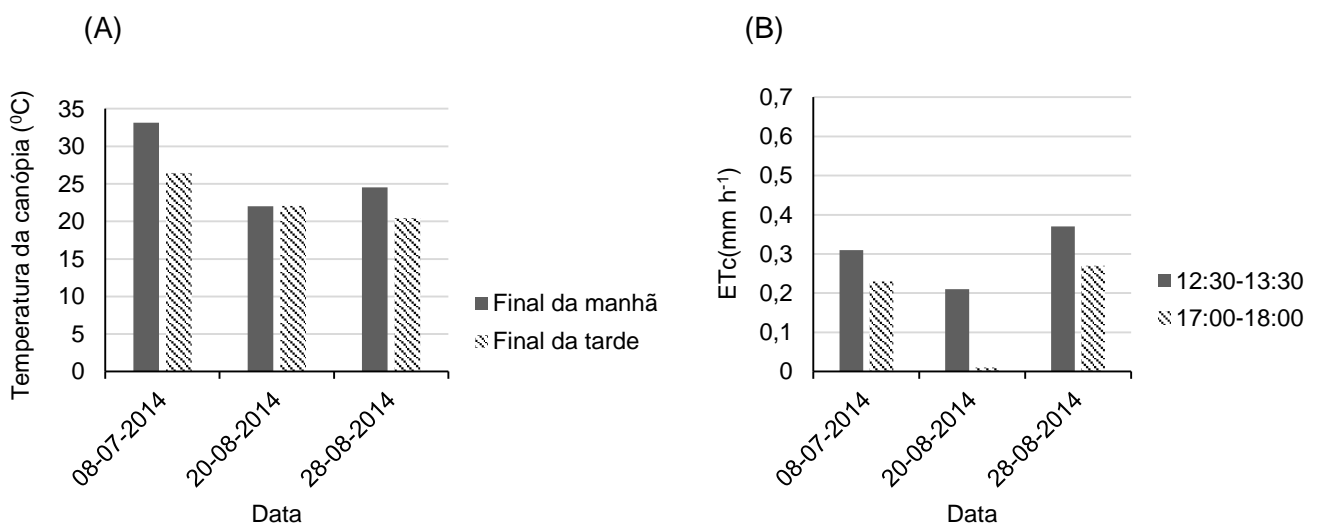
7. Monitorização da temperatura da canópia e relação com a evapotranspiração da cultura

De modo a relacionar a temperatura da canópia com a ETc, realizaram-se duas medições diárias da temperatura da canópia com uma câmara de infravermelhos.

Na figura 21 (A, C, E e G) são apresentados os valores registados para a temperatura da canópia em diversas datas e nos quatro sectores. Da análise da figura 21 verifica-se que a temperatura da canópia dos diferentes sectores é de um modo geral superior no período do final da manhã, quando comparada com o período do final da tarde. Ao comparar sectores para uma mesma data (20/08/2014) verifica-se que os sectores C e D apresentaram valores de temperatura da canópia no período entre as 12:30 e as 13:30h mais elevados, respetivamente 26,1°C e 25,6°C (Figura 21E,

21G), comparativamente aos sectores A e B (22°C e 23,6°C, respetivamente, Figura 21A, 21C). Estas diferenças são consistentes com os padrões de temperatura do ar registados na estufa, nomeadamente mais elevados nos sectores C e D do que nos sectores A e B (Tabela 16). No período entre as 17 e as 18h, as temperaturas da canópiã nos diferentes sectores foram em geral mais baixas do que no período anterior (Figura 21A, C, E e G). Contudo, neste período do dia as diferenças entre sectores não foram evidentes. Considerando o dia de referência 20/08/2014, este padrão entre sectores foi também consistente com os valores de temperatura do ar, que foram semelhantes ao longo de toda a estufa (Tabela 16). Também Msupia (2006) observou padrões de temperatura da folha em rosas em estufa ventilada mais elevados no período próximo das 13h do que ao final da tarde.

Os menores valores de temperatura da canópiã relativamente à temperatura do ar na estufa (Tabela 16), observados na generalidade dos casos, podem ser explicados pelos valores elevados de ET_c associados a elevado défice de pressão de vapor e radiação (Msupia, 2006), que conduzem a um arrefecimento da superfície da folha. Da análise da figura 21 verifica-se que as diferenças de temperatura da canópiã observadas no período das 12:30-13:30h para os vários sectores no dia 20/08/2014 refletem-se nos valores de ET_c observados para o mesmo período. Ou seja, os valores de ET_c nos sectores C e D foram de 0,39 mm e 0,36 mm, respetivamente (Figura 21F, 21H), enquanto nos sectores A e B os valores rondaram os 0,20 mm (0,20 mm e 0,21 mm, respetivamente, Figura 21B, 21D). Também os valores de ET_c obtidos no período das 17-18h foram de forma geral mais baixos comparativamente ao período das 12:30 – 13:30h, indicando uma menor procura evapotranspirativa neste período do dia (Figura 21 B, D, F e H).



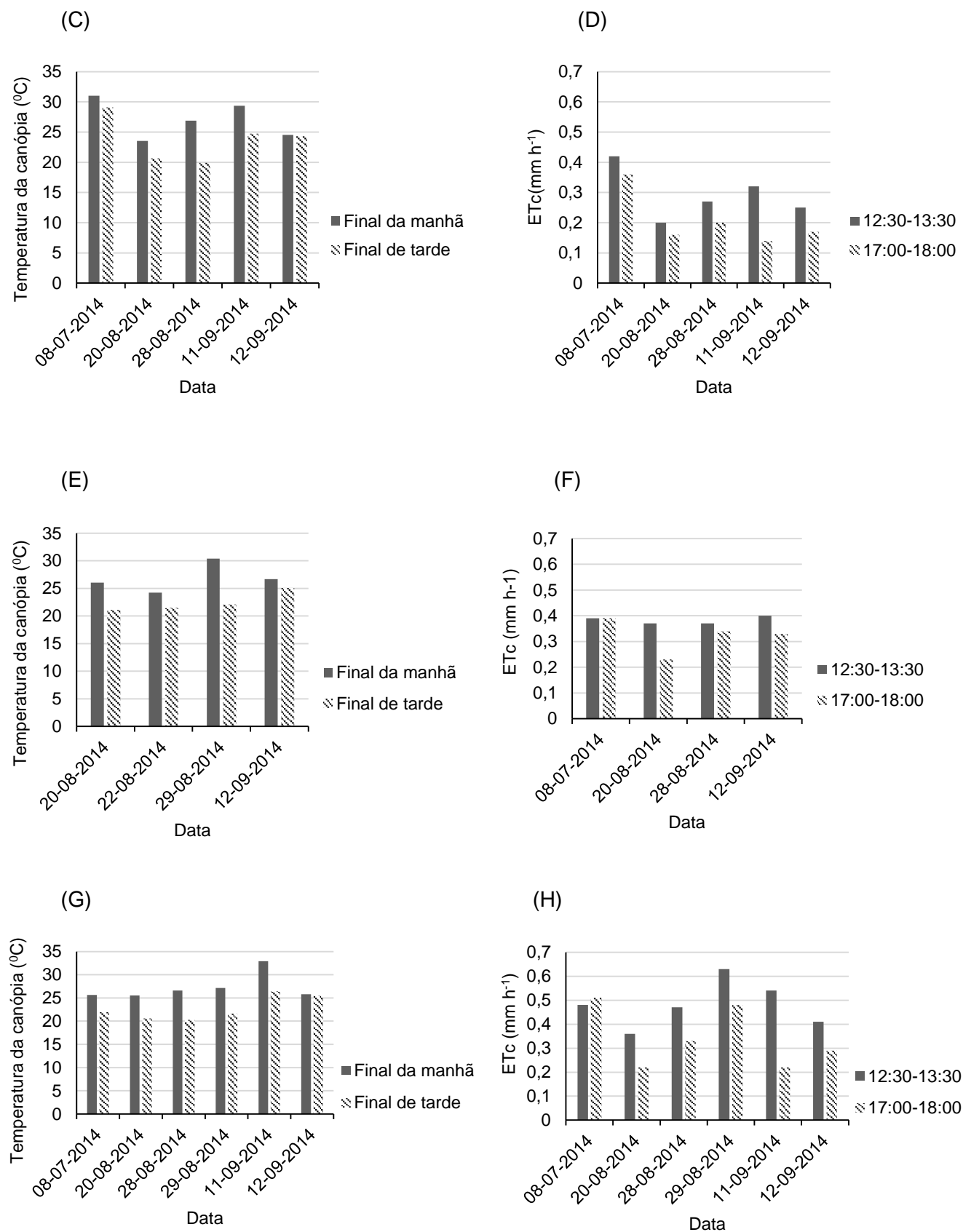


Figura 21. Temperatura da canópia (lado esquerdo) e evapotranspiração cultural (ETc) (lado direito) para os sectores A (A e B), B (C e D), C (E e F) e D (G e H) para os períodos entre as 12.30-13.30h e 17-18h.

Tabela 16. Dados de temperatura do ar e déficit de pressão de vapor (DPV) registados nos sectores A/B e C/D da estufa em dois períodos distintos do dia 20/08/2014.

Variável meteorológica	12.30-13.30h		17-18h	
	Sectores A/B	Sectores C/D	Sectores A/B	Sectores C/D
Temperatura média do ar	23,74	28,59	23,16	23,04
DPV	0,95	1,74	0,88	0,79

Estes resultados abrem perspetivas para a utilização da temperatura da canópia em estudos futuros para apoio à estimativa da ETc através de modelação.

V. CONCLUSÕES

No presente estudo pretendeu-se desenvolver e testar uma metodologia para estimar a evapotranspiração cultural, com base em parâmetros meteorológicos e culturais, num contexto operacional de uma estufa de produção de rosas em substrato.

Neste contexto foram desenvolvidos modelos para estimativa de área foliar, os quais nos permitiram obter informação para apoio ao modelo de estimação da evapotranspiração. Estes modelos revelaram-se precisos e adequados para acomodar a variação inerente a diferentes fases do ciclo da cultura para a cultivar “Red Naomi”. A operacionalidade do modelo desenvolvido para a obtenção da área foliar das hastes, permite que este possa ser utilizado no apoio a práticas culturais em rosas de corte nomeadamente na gestão da rega.

A plataforma monocélula que foi especificamente adaptada às condições de cultivo da estufa revelou-se funcional para a determinação da evapotranspiração cultural. Esta permitiu ainda determinar com rigor e precisão as drenagens e as dotações.

No que respeita ao desenvolvimento de um modelo que conferisse maior rigor na obtenção de valores de drenagem, num contexto operacional, concluiu-se que é necessário recorrer não apenas a variáveis ambientais, mas também culturais. Desta forma foi possível desenvolver um modelo rigoroso e preciso, constituindo este um importante contributo para a programação de rega através do sensor de radiação.

O modelo de estimação da evapotranspiração cultural desenvolvido apresentou valores elevados de rigor e precisão recorrendo a um número reduzido de descritores, que representa uma vantagem em contexto operacional relativamente a outros modelos mais complexos. Ao que acresce o facto de os parâmetros seleccionados pelo modelo serem passíveis de serem obtidos sem necessidade de grande investimento em termos de custos.

A informação obtida com a câmara térmica revelou boas perspectivas para a utilização da temperatura da canópia em estudos futuros da modelação da evapotranspiração em contexto de estufa. Outros trabalhos poderão também vir a ser desenvolvidos de modo a afinar a metodologia, nomeadamente considerando um período mais alargado de medições ao longo dia e do ano, bem como em estufas com outro tipo de condições.

Este trabalho permitiu ainda dar um contributo para o processo de automatização de rega, através do desenvolvimento de modelos de estimação da evapotranspiração cultural e do valor de radiação acumulada, que ao serem incorporados em equipamento de fertirrigação, permitem uma rega autónoma. No entanto seria importante que estes fossem testados em diferentes condições

(e.g. diferentes condições do ano, diferentes tipos de estufa) de modo a aferir o seu rigor, precisão e portabilidade.

Poder-se-ia ainda potenciar a aplicabilidade do modelo de estimação da evapotranspiração cultural através da eventual substituição das variáveis área foliar das hastes e número de folhas do “pulmão” das plantas por um parâmetro mais facilmente quantificável (e.g. altura média das plantas).

Também foi possível verificar as eventuais aplicações dos lisímetros de carga que para além de determinarem diretamente a evapotranspiração da cultura, também apresentam capacidade de determinação das dotações e drenagens das regas, abrindo perspetivas na automatização da aplicação de dotação desejada e determinação/ou obtenção da drenagem pretendida.

Seria potencialmente interessante testar o desempenho de sensores de carga numa estrutura de maior área (e.g. calha com um determinado número de unidades de produção de plantas). Desta forma a área monitorizada seria maior e mais representativa da cultura.

Referências bibliográficas

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO: Irrigation and Drainage Paper No. 56., 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- American Rose Society, 2011. The Anatomy of Roots, Stems and Leaves of Roses, Consultado a 23 de março em <http://www.rose.org/wp-content/uploads/2011/03/The-Anatomy-of-Roots-Stems-and-Leaves-of-Roses.pdf>.
- Arevalo, J.J., Velez, J.E. and Camacho-Tamayo, J.H., 2013. Uso eficiente del agua para el cultivo de rosa cv. Freedom bajo invernadero. Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient., 17(8): 811-817.
- Bacci, L. et al., 2011. Modelling Evapotranspiration of Container Crops for Irrigation Scheduling. In: G. Gerosa (Editor), Evapotranspiration - From Measurements to Agricultural and Environmental Applications. InTech.
- Brun, R. and Mary, L., 2003. La rose sous serre pour la fleur coupée. Association nationale des structures d'expérimentation et de démonstration en horticulture.
- Cadahia, C., 2005. Fertirrigación: cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Mundi-Prensa.
- Carvalho, L., Rios, G., Miranda, W. and Castro Neto, P., 2011. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. Pesquisa Agropecuária Tropical, 41(3): 456-465.
- Castilla, 2012. Greenhouse Technology and Management. CAB International.
- Cayanan, D., 2009. Improving greenhouse irrigation using a wireless soil moisture sensor-based automated irrigation system. Dissertação de mestrado, University of Guelph,, Ottawa, 209 .
- Cruz-Blanco, M., Lorite, I.J. and Santos, C., 2014. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi-arid conditions. Agricultural Water Management, 131: 135-145.
- De Swart, E.A.M. et al., 2004. Non-destructive estimation of leaf area for different plant ages and accessions of *Capsicum annuum* L. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 79(5): 764-770.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W., 1977. Crop water requirements. (Irrigation and drainage paper, 24). Rome.
- Farahani, H.J., Howell, T.A., Shuttleworth, W.J. and Bausch, W.C., 2007. Evapotranspiration: Progress in measurement and modeling in agriculture. Transactions of the Asabe, 50(5): 1627-1638.
- Farias, J., Bergamaschi, H. and Martins, S., 1994. Evapotranspiração no interior de estufas plásticas. Revista Brasileira de Agrometeorologia, 2: 17-22.
- Fascella, G., Agnello, S., Maggiore, P., Zizzo, G. and Guarino, L., 2010. Effect of Controlled Irrigation Methods Using Climatic Parameters on Yield and Quality of Hydroponic Cut Roses. In: Y.

- Ueda (Editor), V International Symposium on Rose Research and Cultivation. *Acta Horticulturae*, 65-71.
- Fascella, G. and Zizzo, G.V., 2005. Effect of growing media on yield and quality of soilless cultivated rose. In: M.U. Gavilan (Editor), *Proceedings of the International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics*. *Acta Horticulturae*, 133-138.
- Fernandez, M.D. et al., 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science*, 28(6): 497-509.
- Gallardo, M., Thompson, R.B. and Fernández, M.D., 2013. Water requirements and irrigation management in Mediterranean greenhouses: the case of the southeast coast of Spain. In: *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops. Principles for Mediterranean climate areas*. *FAO Plant Production and Protection Paper 217*, FAO.
- Gao, M., Van der Heijden, G., Vos, J., Eveleens, B.A. and Marcelis, L.F.M., 2012. Estimation of leaf area for large scale phenotyping and modeling of rose genotypes. *Scientia Horticulturae*, 138: 227-234.
- Genc, L. et al., 2013. Determination of water stress with spectral reflectance on sweet corn (*Zea mays* L.) using classification tree (CT) analysis. *Zemdirbyste-Agriculture*, 100(1): 81-90.
- Gil, M., Rodriguez-Sinobas, L., Juana, L., Sanchez, R. and Losada, A., 2008. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. *Irrigation Science*, 26(6): CP3-458.
- Gommes, R. et al., 1981. *Agrometeorological forecasting. Guide to agricultural meteorological practices*. World Meteorological Organization.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 2(1): 96-99.
- Haynes, J., 2012. History of Roses - The Final Chapter. Consultado a 23 de março em <http://www.rose.org/wp-content/uploads/2012/01/History-of-Roses-The-Final-Chapter.pdf>.
- Hoog, J., 2001. *Handbook for Modern Greenhouse Rose Cultivation*. Applied Plant Research, 220 pp.
- Ilahi, W., 2009. *Evapotranspiration models in greenhouse*. Dissertação de mestrado, Wageningen University, 52 pp.
- INE, I.P., 2013. *Floricultura e Plantas Ornamentais 2012*. Consultado a 11 de março em http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=158464432&PUBLICACOESmodo=2.
- Jones, H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407): 2427-2436.
- Jones, H.G., 2008. Irrigation scheduling - Comparison of soil, plant and atmosphere monitoring approaches. In: I. Goodwin and M.G. Oconnell (Editors), *Proceedings of the Fifth International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops*. *Acta Horticulturae*, 391-403.
- Katsoulas, N. and Kittas, C., 2011. Greenhouse Crop Transpiration Modelling. In: G. Gerosa (Editor), *Evapotranspiration - From Measurements to Agricultural and Environmental Applications*. InTech.

- Katsoulas, N., Kittas, C., Dimokas, G. and Lykas, C., 2006. Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality. *Biosystems Engineering*, 93(2): 237-244.
- Kittas, C., Dimokas, G., Lykas, C. and Katsoulas, N., 2005. Effect of two irrigation frequencies on rose flower production and quality. In: G. VanStraten, G.P.A. Bot, W.T.M. VanMeurs and L.M.F. Marcelis (Editors), *Proceedings of the International Conference on Sustainable Greenhouse Systems*, Vols 1 and 2. *Acta Horticulturae*, 333-339.
- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst.Wat. Engrs.*(11): 277-288.
- Manners, M., 2011. A Short Discussion of Flower Structure. . American rose society. Consultado a 23 de março em <http://www.ars.org/wp-content/uploads/2011/03/A-Short-Discussion-of-Flower-Structure.pdf>.
- Meier, U. et al., 2009. Phenological growth stages of roses (*Rosa* sp.): codification and description according to the BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 154(2): 231-238.
- Mercurio, G., 2007. Cut rose cultivation around the world. Aesse stampa, as Benevento, Italy, 254 pp.
- Meric, M.K., Tuzel, I.H., Tuzel, Y. and Oztekin, G.B., 2011. Effects of nutrition systems and irrigation programs on tomato in soilless culture. *Agricultural Water Management*, 99(1): 19-25.
- Montero, F.J., de Juan, J.A., Cuesta, A. and Brasa, A., 2000. Nondestructive methods to estimate leaf area in *Vitis vinifera* L. *Hortscience*, 35(4): 696-698.
- Montgomery, D. and Peck, A., 1992. Introduction to linear regression analysis. John Wiley and Sons USA, New York.
- Mpusia, P., 2006. Comparison of water consumption between greenhouse and outdoor cultivation - Dissertação de mestrado, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation
- NSW, 2009a. Preventing pests and diseases in the greenhouse - Distribution uniformity of irrigation. Consultado a 26 de Janeiro de 2014 em http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0008/308483/hydro-irrig-factsheet2-distribution-uniformity-of-irrigation.pdf.
- NSW, 2009b. Preventing pests and diseases in the greenhouse - Principles of daily irrigation periods. Consultado a 24 de janeiro em http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0010/308485/hydro-irrig-factsheet3-principles-of-daily-irrigation-periods.pdf.
- Oki, L.R., Lieth, J.H. and Tjosvold, S., 2001. Irrigation of *Rosa hybrida* L. 'Kardinal' based on soil moisture tension increases productivity and flower quality. In: N. Zieslin and H. Agbaria (Editors), *Proceedings of the Third International Symposium on Rose Research and Cultivation*. *Acta Horticulturae*, 213-219.
- Oliveira, 2011. Técnicas de regadio - Teoria e Prática, 1. Isaurindo Oliveira, Beja.
- Oliveira et al., 2014. Evapotranspiração da roseira cultivada em ambiente protegido. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.*, 18(3): 314-321.

- Pardossi, A. et al., 2011. Fertigation and Substrate Management in Closed Soilless Culture, Università di Pisa, Pisa.
- Pereira, L.S., 2004. Necessidades de água e métodos de rega. Europa-America
- Pivetta, C., 2007. Evapotranspiração máxima do tomate e do pimentão em estufa plástica em função da evaporação no "Piche" e outras variáveis meteorológicas e fenométricas- Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev*(100): 81-92.
- Raviv and Blom, T.J., 2001. The effect of water availability and quality on photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses. *Scientia Horticulturae*, 88(4): 257-276.
- Raviv and Lieth, J.H., 2008. *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, San Diego, USA, 587 pp.
- Reis, M., 2014. Sugestões para a uniformização das designações relativas aos sistemas de cultivo sem solo. *Revista da Associação Portuguesa de Horticultura*(115): 15-19.
- Saha, U.K., Papadopoulos, A.P., Hao, X. and Khosla, S., 2008. Irrigation Strategies for Greenhouse Tomato Production on Rockwool. *HortScience*, 43(2): 484-493.
- Savvas, D., Gianquinto, G., Tuzel, Y. and Gruda, N., 2013. Soilless culture. In: *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops. Principles for Mediterranean climate areas*. FAO Plant Production and Protection Paper 217.
- Schreurs, 2014. Consultado a 15 de abril de 2014 em <http://www.schreurs.nl/products/200/red-naomi>.
- Suay, R. et al., 2003. Measurement and estimation of transpiration of a soilless rose crop and application to irrigation management. In: G. LaMalfa, V. Lipari, G. Noto and C. Leonardi (Editors), *Proceedings of the Sixth International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climate: Product and Process Innovation*, Vols 1 and 2. *Acta Horticulturae*, 625-630.
- Takakura, T. et al., 2009. Measurement of evapotranspiration rate in a single-span greenhouse using the energy-balance equation. *Biosystems Engineering*, 102(3): 298-304.
- Uno, G., Storey, R. and Moore, R., 2001. *Principles of botany*. McGraw-Hill.
- Vásquez, J., 2010. "Incidencia de la aplicación de citoquininas en tres estados fenológicos y dos sectores del tallo en la brotación de basales en el cultivo del rosaL (Rosa s.p.) Var. Circus" - Dissertação de mestrado, Universidad Técnica De Ambato
- Villalobos, F., Mateos Iñiguez, L., Orgaz, F. and Fereres Castiel, E., 2009. *Fitotecnia: Bases y tecnologías de la producción agrícola*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Yong, A., 2004. El cultivo del rosal y su propagación. *Cultivos Tropicales* 2(25): 16.

ANEXOS

ANEXO 1

Durante o período compreendido entre janeiro e abril de 2014 foram efetuadas quatro medições com o espectroradiómetro portátil FieldSpec HandHeld 2™ nas três unidades experimentais do sector A. Estas medições permitiram a recolha de dados espectrais da canópia de cada planta das unidades de amostragem do sector. Contudo esta metodologia não pode ser aplicada durante o período de recolha de dados para o desenvolvimento do modelo de estimativa de ET, devido ao facto de a estufa se encontrar caiada. Os dados recolhidos foram utilizados para determinar o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

Tabela 17. Valores do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para as unidades de amostragem do sector A (UA1, UA2, UA3) nos dias 23 de janeiro, 21 de fevereiro, 7 de março e 21 de abril de 2014.

Sector	23-01-2014			21-02-2014			07-03-2014			21-04-2014		
	UA 1	UA 2	UA 3	UA 1	UA 2	UA 3	UA 1	UA 2	UA 3	UA 1	UA 2	UA 3
A	0,32	0,57	0,38	0,74	0,75	0,73	0,81	0,88	0,84	0,62	0,69	0,51